

Санкт-Петербургский государственный университет.

Бутаков Никита Юрьевич

Выпускная квалификационная работа:

**“ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  
САНКТ-ПЕТУРБУРГА МОДЕЛЬЮ WRF.”**

Уровень образования:

Направление 05.04.04. «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа ВМ.5779.2018 «Гидросфера и атмосфера:  
моделирования и прогноз»

Научный руководитель: к.г.н.,  
доцент Лемешко Наталья Александровна  
Рецензент: главный специалист  
отдела динамической метеорологии  
ГГО им. А.И Воейкова, д.г.н.,  
профессор Русин Игорь Николаевич

Санкт-Петербург

2020

## Содержание.

Введение.	4
Глава 1. Модель WRF как мощный и доступный инструмент современного ученого климатолога.	6
1.1. Общие сведения о модели WRF-ARW	6
1.2. Исходные уравнения.	7
1.3. Начальные и граничные условия, сетка и географические данные.	10
1.4. Параметризации, используемые в WRF.	11
Глава 2. Настойка модели и проведение тестовых экспериментов.	13
2.1. Настройка модели.	13
2.2. Результаты тестового моделирования.	17
Глава 3. Подбор оптимальной комбинации схем параметризации процессов подсеточного масштаба.	21
3.1. Подбор оптимальной схемы параметризации микрофизических процессов.	21
3.2. Подбор оптимальной схемы параметризации конвекции.	26
3.3. Подбор оптимальной схемы параметризации длинноволновой радиации.	30
3.4. Подбор оптимальной схемы параметризации коротковолновой радиации.	36
3.5. Подбор оптимальной комбинации схем параметризации пограничного и приземного слоя	39
3.6. Подбор оптимальной схемы параметризации почвенного слоя.	45
3.7. Подбор оптимальной схемы параметризации микрофизики города.	49
3.8. Выводы из главы.	54
Глава 4. Подбор оптимальной конфигурации вычислительных сеток.	58

Глава 5. Оценка чувствительности модели к изменению эмпирических коэффициентов в параметризации ППС по схеме BouLac.	63
5.1. Подбор эмпирического коэффициента $C_\varepsilon$ для расчёта диссипации КЭТ.	64
5.2. Подбор эмпирического коэффициента $C_k$ для расчёта коэффициента турбулентного обмена импульса.	68
5.3. Выводы из главы.	70
Заключение.	72
Список использованных источников.	73
Приложение А.	76
Приложение Б.	79

## **Введение.**

Современные прогнозы погоды и климата основаны на численном решении уравнений гидродинамики атмосферы. В основе такого прогноза лежат гидродинамические модели атмосферы.

В настоящее время существуют, по крайней мере, три масштаба моделей, описывающих формирование погоды и климата с различным пространственным масштабом:

1) глобальные, которые используют в самых больших центрах погоды для прогноза крупномасштабных процессов и формирования динамических краевых условий к региональным прогнозам;

2) региональные, которые имеют шаг около 3-10 километров, и служат для детального описания развития синоптических процессов над регионами, которые обслуживаются большинством центров погоды;

3) мелкомасштабные, с шагом от 100 до 500 метров, предназначенные для детального изучения процессов, формирующих погоду приземного и пограничного слоя.

Все модели описывают одну и ту же физику, но с разной детализацией и параметризациями явно не представляемых в модели, но важных физических процессов. В настоящее время наиболее полезны для профессиональной деятельности гидрометеорологов региональные модели. Они позволяют рассматривать все важнейшие опасные явления, такие, например, как наводнения всех видов, опасные конвективные явления, опасные температурные волны. Кроме того, региональные модели используются для статистического моделирования формирования и изменений регионального климата. Сложность этих моделей такова, что их разработкой заняты только большие коллективы высококвалифицированных работников. Но те модели, которые имеются в свободном доступе, дают возможность после изучения применять их для самых разнообразных региональных исследований, в частности, для восполнения недостающей климатологической информации.

Все гидродинамические модели атмосферы не лишены ошибок. Типов ошибок гидродинамического моделирования несколько. Это ошибки начальных данных, ошибки, связанные с постановкой граничных условий, ошибки в формулировке (упрощении) уравнений, ошибки, обусловленные выбором пространственного и временного разрешения модели, ошибки, связанные с выбором схем параметризации физических процессов подсеточного масштаба.

Все эти ошибки оказывают существенное влияние на качество моделирования. Это объясняет актуальность данного исследования, которое посвящено уменьшению влияния некоторых описанных выше ошибок на качество воспроизведения приземной температуры моделью WRF.

Целью данного исследования была оценка качества воспроизведения приземной температуры Санкт-Петербурга моделью WRF при различных конфигурациях модели и улучшение качества моделирования путём подбора оптимальной конфигурации.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Изучить мезомасштабную модель WRF.
2. Изучить интерпретационные языки программирования MATLAB и NCL для визуализации результатов моделирования.
3. Провести численные эксперименты с моделью WRF.
4. Произвести оценку качества моделирования и подобрать оптимальную конфигурацию модели для г. Санкт-Петербург.

Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. В первой главе приводятся основные сведения о модели WRF. Во второй главе описывается процесс настройки модели и производится верификация результатов тестового моделирования. В третьей главе подбирается оптимальная комбинация схем параметризаций процессов подсеточного масштаба с целью улучшения качества моделирования. В четвёртой главе осуществляется подбор оптимальной конфигурации вычислительных сеток с целью увеличения качества моделирования. В пятой главе производится подбор эмпирических коэффициентов в схеме параметризации планетарного пограничного слоя также с целью улучшения качества моделирования. В конце работы приведён список использованных источников, состоящий из 44 наименований, а также два приложения.

# **Глава 1. Модель WRF как мощный и доступный инструмент современного ученого климатолога.**

## **1.1. Общие сведения о модели WRF-ARW**

Модель WRF (Weather Research and Forecasting) с динамическим ядром ARW (Advanced Research WRF) является численной негидростатической моделью атмосферы (с возможностью гидростатического режима) в предположении полностью сжимаемой среды. Вертикальная система координат соответствует гидростатическому закону изменения давления с высотой. В модели используется С-сетка Аракавы и схемы интегрирования Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка по времени, а также схемы 2-6 порядка для переноса в горизонтальном и вертикальном направлениях. Модель использует малый шаг для гравитационных и акустических волн (<15 с. в данной работе).

Код модели WRF-ARW содержит несколько программ инициализации (ideal.exe и real.exe), программу численного интегрирования (wrf.exe). Модель WRF-ARW версии 4 поддерживает множество возможностей:

1. Моделирование реальных (real.exe) и идеализированных (ideal.exe) данных.
2. Использование различных вариантов граничных условий для реальных и идеализированных данных.
3. Использование различных комбинаций параметризаций.
4. Негидростатическое и гидростатическое приближение (на выбор).
5. Использование вложенных сеток.
6. Использование в задачах различного пространственного масштаба, от нескольких метров до нескольких тысяч километров.

В случае, если планируется моделирование реальных условий погоды с использованием вариационного анализа, то понадобятся следующие программные модули:

1. Система предварительной обработки данных WPS (WRF Preprocessing System).
2. Система вариационной ассимиляции данных WRF-DA (Data Assimilation).
3. Модель WRF-ARW (Weather Research & Forecasting - Advanced Research WRF).
4. Средства постобработки и визуализации данных.

Принципиальная схема WRF-ARW представлена на рисунке 1.

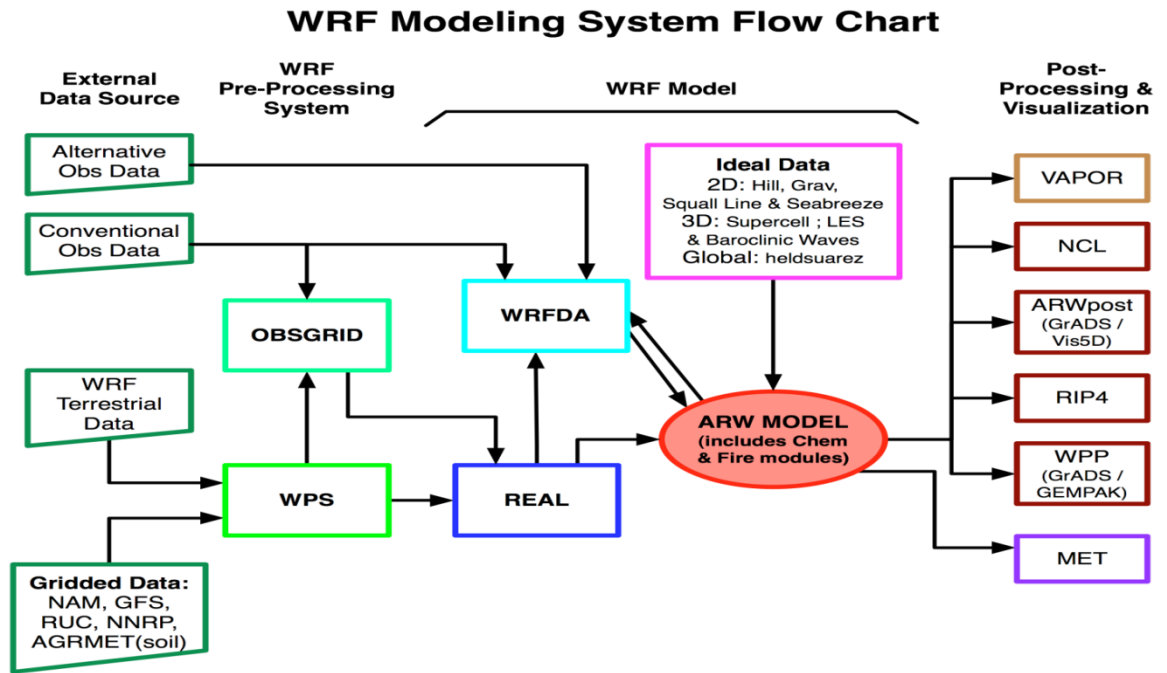


Рисунок 1. Принципиальная схема WRF-ARW [1].

## 1.2. Исходные уравнения.

Модель WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты  $\eta$ , которая напоминает сигма координату, но отличается от нее тем, что она определяется не через полное давление  $p$ , а через его гидростатическую составляющую

$$\eta = (p_{dh} - p_{dht}) / \mu_d, \quad (1.1)$$

где  $\mu_d$  определяет массу сухого воздуха в столбе, а  $p_{dh}$  и  $p_{dht}$  представляют собой гидростатическое давление в сухой атмосфере в данной точке и на верхней границе области, соответственно.

В уравнениях (1.5) – (1.11) компоненты определены следующим образом

$$U = \mu_d u / m, \quad V = \mu_d v / m, \quad W = \mu_d w / m, \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta} / m, \quad \Theta = \mu_d \theta \quad (1.2)$$

где  $m$  – масштабный множитель карты,  $\dot{\eta}$  – вертикальная скорость в орографических координатах,  $\theta$  – потенциальная температура,  $u$ ,  $v$  и  $w$  – компоненты скорости ветра.

Кроме этого далее используются обозначения  $\Phi = gz$  –геопотенциал,  $g$ –ускорение свободного падения,  $p$ –давление,  $\alpha_d = (1/\rho_d)$  – удельный объем сухого воздуха, а  $\alpha$  – удельный объем, содержащий помимо сухого воздуха водяной пар и гидрометеоры  $\alpha = \alpha_d(1 + q_v + q_c + q_r + q_i + \dots)^{-1}$ , где  $q_*$  –отношение смеси водяного пара, облачности, дождя, льда и т.д.

$$\theta = \theta(1 + (R_v / R_d)q_v) \cong \theta(1 + 1,61q_v) ; \quad Q_m = \mu_d q_m, \quad q_m = q_v, q_c, q_r, q_i, \dots \quad (1.3)$$

где  $R_d$  и  $R_v$  – газовые постоянные для сухого и влажного воздуха, соответственно.

$F$  с соответствующими индексами-все внешние члены, умноженные на  $\mu_d$ .

Термодинамические переменные представлены в виде суммы возмущений и фонового гидростатического значения:

$$p = \bar{p}(z) + p', \quad \Phi = \bar{\Phi}(z) + \Phi', \quad \alpha = \bar{\alpha}(z) + \alpha', \quad \mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d. \quad (1.4)$$

С учетом этих представлений и масштаба карты система исходных уравнений для возмущений с учётом влажности примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial}{\partial x}(Uu) + \frac{\partial}{\partial y}(Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega u) + \left( \mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \\ + (\alpha / \alpha_d) \left( \mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = F_{Ucor}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial}{\partial x}(Uv) + \frac{\partial}{\partial y}(Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega v) + \left( \mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \\ + (\alpha / \alpha_d) \left( \mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = F_{Vcor} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial}{\partial x}(Uw) + \frac{\partial}{\partial y}(Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega w) -$$



$$-\frac{1}{m}g(\alpha/\alpha_d)\left[\frac{\partial p'}{\partial \eta}-\bar{\mu}_d(q_v+q_c+q_r)\right]+\frac{1}{m}\mu'_d g=F_{wcor}, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial t}+\frac{1}{\mu_d}\left[m^2\left(U\frac{\partial \Phi}{\partial x}+V\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)+m\Omega\frac{\partial \Phi}{\partial \eta}-gW\right]=0, \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial \mu'_d}{\partial t}+m^2\left[\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}\right]+m\frac{\partial \Omega}{\partial \eta}=0, \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t}+m^2\left[\frac{\partial}{\partial x}(U\theta)+\frac{\partial}{\partial y}(V\theta)\right]+m\frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega\theta)=F_{\Theta}, \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t}+m^2\left[\frac{\partial}{\partial x}(Uq_m)+\frac{\partial}{\partial y}(Vq_m)\right]+m\frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega q_m)=F_{Q_m}. \quad (1.11)$$

Уравнение гидростатики в системе для возмущений имеет вид

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial \eta}=-\bar{\mu}_d\alpha'_d-\alpha_d\mu'_d. \quad (1.12)$$

В уравнениях движения введены все компоненты силы Кориолиса  $F_{cor}$  и члены, учитывающие кривизну Земли

$$F_{Ucor}=\left(f+u\frac{\partial m}{\partial y}-v\frac{\partial m}{\partial x}\right)V-eW\cos\alpha_r-\frac{uW}{r_e}, \quad (1.13)$$

$$F_{Vcor}=-\left(f+u\frac{\partial m}{\partial y}-v\frac{\partial m}{\partial x}\right)U+eW\sin\alpha_r+\frac{vW}{r_e}, \quad (1.14)$$

$$F_{Wcor} = e(U \cos \alpha_r - V \sin \alpha_r) + \left( \frac{uU + vV}{r_e} \right). \quad (1.15)$$

здесь  $\alpha_r$  – локальный угол между осью  $u$  и меридианом,  $f = 2\Omega_e \sin \varphi$ ,  $e = 2\Omega_e \cos \varphi$ ,  $\Omega_e$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$ , – широта местности,  $r_e$  – радиус Земли. Члены, содержащие  $u$ , являются членами горизонтальной кривизны земной поверхности, члены, содержащие  $v$ , описывают кривизну земной поверхности по вертикали, а члены с  $e$  и  $f$  представляют собой силу Кориолиса.

### 1.3. Начальные и граничные условия, сетка и географические данные.

Начальные условия в модели WRF-ARW могут задаваться аналитически при решении идеализированных задач (ideal.exe) или браться из крупномасштабных реанализов и прогнозов (real.exe). Имеется также возможность включения данных наблюдений с использованием процедуры трехмерного вариационного усвоения данных. При использовании модели в прогностических целях требуется информация о геопотенциале, температуре, влажности, горизонтальных компонентах скорости ветра, температуре подстилающей поверхности, приземном давлении, температуре почвы, водном эквиваленте снежного покрова, альбедо подстилающей поверхности, доле растительного покрова, рельефе, а также маска вода-суша. Вертикальная скорость, а также все переменные, характеризующие гидрометеоры, принимаются в начальный момент равными нулю.

Как уже упоминалось ранее, в модели используется С-сетка Аракавы. Шаг сетки и количество расчётных узлов определяются пользователем в файле namelist. Имеется возможность использования вложенных сеток. При этом присутствует выбор одностороннего или двухстороннего взаимодействия сеток. При одностороннем взаимодействии сеток материнская сетка определяет граничные условия вложенной сетки, тогда как вложенная сетка никак не влияет на материнскую. При двухстороннем же взаимодействии значения метеорологических параметров, рассчитанные в узлах материнской сетки, в зоне, где материнская сетка покрывается вложенной, заменяются значениями, рассчитанными на вложенной сетке. Граничные условия для материнской сетки определяются из данных реанализа или прогнозов путём интерполяции этих данных в граничные узлы материнской сетки. При заданных зависящих от времени граничных условиях на материнской сетке устанавливается зона релаксации вдоль каждой границы, распространяющаяся внутрь области на несколько узлов сетки. В пределах этой зоны модель

релаксирует к значениям крупномасштабного реанализа или прогноза на границах области. Размер зоны релаксации выбирается пользователем. В отличие от материнской сетки вложенная сетка не имеет зону реалаксации.

Для описания влияния рельефа Земли на поля метеорологических элементов в WRF-ARW используются географические данные. Разрешение географических данных выбирается в файле namelist.

#### 1.4. Параметризации, используемые в WRF.

Физические процессы подсеточного масштаба не могут быть представлены на вычислительной сетке и описываются различными схемами параметризации.

В модели WRF выбор параметризаций осуществляется также в namelist'е перед запуском модели. Ниже в таблице 1 представлены некоторые имеющиеся в WRF параметризации.

Класс параметризации	Схема
Параметризация микрофизических процессов	Линя WSM6 Томпсона
Параметризация конвекции	Параметризация Каина-Фрича Параметризация Беттса-Миллера-Янича Ансамбль Грелла-Девени
Параметризация длинноволновой радиации	RRTM RRTMG Схема центра космических полётов им. Годдарда (NASA)
Параметризация коротковолновой радиации	Дудья RRTMG Схема центра космических полётов им. Годдарда (NASA)
Параметризации пограничного слоя	университета Ёнсей Меллора-Ямады-Янича Bougeault-Lacarrère

Параметризации приземного слоя	MM5 Eta
Параметризации почвенного слоя	Noah RUC Noah-MP
Параметризация микрофизики города	UCM BEP BEM

Таблица 1. Параметризации в WRF-ARW.

Более подробно схемы параметризаций будут описаны в главе 3, при подборе их оптимальной комбинации.

## **Глава 2. Настойка модели и проведение тестовых экспериментов.**

В этой главе был произведён тестовый расчёт модели. Для этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Определить период моделирования.
- 2) Подготовить начальные данные для модели и данные наблюдений на метеостанции для верификации моделирования.
- 3) Подобрать вычислительную сетку с определённым шагом по пространству.
- 4) Исходя из критерия Куранта-Фридрихса-Леви, подобрать такой шаг по времени, который будет обеспечивать устойчивость численного решения.
- 5) Осуществить выбор параметризаций в namelist'е для тестового запуска модели.
- 6) Произвести тестовый запуск модели.
- 7) Произвести верификацию результатов численного моделирования.

### **2.1. Настройка модели.**

Моделирование было произведено для июля 2017 года, поскольку в это время года изменение долготы дня минимально и влияние годового хода радиации не так существенно. Выбор года обосновывается тем, что средняя месячная температура за июль 2017 года была наиболее низкой в XXI веке. Для того чтобы иметь приемлемые по точности с точки зрения статистики результаты нужно взять для моделирования не менее 30 дней. Ввиду вышесказанного, был взят период моделирования с 01.07.2017 по 01.08.2017.

Начальные данные для модели брались из реанализа GFS [2] с пространственным разрешением  $0,5 \times 0,5^\circ$  за 00, 06, 12, 18 UTC. Для верификации смоделированных данных брались срочные данные наблюдений за поверхностной температурой воздуха на метеостанции в г. Санкт-Петербург с сайта ВНИИГМИ МЦД [3].

Для тестового запуска модели было решено взять шаг по пространству 9 км. Уменьшение шага по пространству приведёт к увеличению количества узлов сетки и необходимости уменьшения шага по времени в угоду устойчивости модели. Это приведёт к существенному увеличению времени моделирования. По этой же причине в этой главе не использовались вложенные сетки. Была выбрана сетка  $60 \times 60$  узлов, покрывающая

территорию Северо-Западного региона РФ с Санкт-Петербургом в центре расчётной области. Расчётная область представлена на рисунке 2.

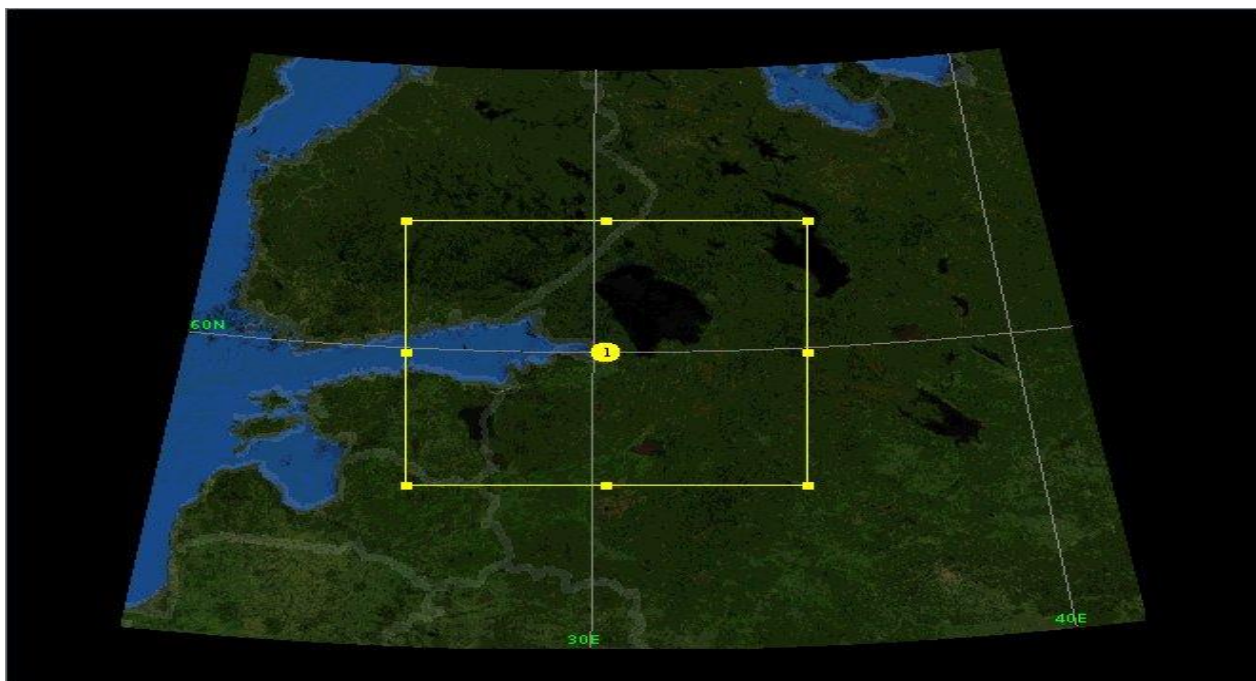


Рисунок 2. Расчётная область.

Вопрос об улучшении качества прогноза путём использования вложенных сеток будет подробно рассмотрен в главе 4 после подбора оптимальной комбинации параметризаций физических процессов в главе 3.

Разрешение географических данных было выбрано с таким расчётом, чтобы оно не было больше пространственного разрешения. Для вычислительной сетки с разрешением 9 километров подходит разрешение географических данных в 2 угловые минуты, поскольку 2 угловые минуты для широты 60°-это 1,85 км, что существенно меньше 9 км.

Как уже упоминалось в главе 1, в модели WRF-ARW для аппроксимации производных по времени используются схемы Рунге-Кутты 2-го и 3-го порядка точности. Выбор схемы аппроксимации выполняется в `namelist`'е. В данной работе применялась схема Рунге-Кутты 3-го порядка точности (RK3).

Схема RK3, описанная в работе (Wicker and Skamarock, 2002) [4], является схемой типа предиктор-корректор. Прогностические переменные в этой схеме определяются как  $\Phi = (U, V, W, \theta, \phi', \mu', Qm)$  и модельные уравнения как  $\Phi_t = R(\Phi)$ . Интегрирование по времени в схеме Рунге-Кутты 3-го порядка точности осуществляется в 3 дробных шага с  $\Phi(t)$  до  $\Phi(t+\Delta t)$ :

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t) \quad (2.1)$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*) \quad (2.2)$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}) \quad (2.3)$$

где  $\Delta t$  – модельный шаг по времени. Верхними индексами обозначен временной уровень.

Величина шага по времени для схемы Рунге-Кутты 3-го порядка точности лимитируется адвективным числом Куранта ( $u\Delta t/\Delta x$ ) и выбранной пользователем схемы адвекции. В WRF-ARW имеется возможность выбора схемы Рунге-Кутты 2– 6 порядков точности для дискретизации адвективных условий. Ограничение величины шага по времени для одномерной адвекции в схеме Рунге-Кутты 3-го порядка точности, использующей адвективные схемы различных порядков точности, даётся в работе (Wicker and Skamarock, 2002) [4]. В таблице 2 приведены значения чисел Куранта для разных схем аппроксимации производных по времени и схем пространственной дискретизации адвекции, полученные при максимально возможной величине шага по времени.

Схема	Порядок пространственной дискретизации			
	3	4	5	6
Чехарды	Неустойчива	0,72	Неустойчива	0,62
РК2	0,88	Неустойчива	0,30	Неустойчива
РК3	1,61	1,26	1,42	1,08

Таблица 2. Максимально допустимые значения чисел Куранта для одномерной адвекции [4].

Как видно из таблицы 2, максимально возможные числа Куранта для адвекции в схеме Рунге-Кутты 3-го порядка точности почти в два раза больше, чем для схемы чехарды и схемы Рунге-Кутты 2-го порядка точности. Именно поэтому в данной работе будет

использоваться схема Рунге-Кутты 3-го порядка точности. В угоду точности выбрана аппроксимация адвекции схемой Рунге-Кутты 6-го порядка точности.

Для трёхмерной адвекции максимально допустимые числа Куранта, приведённые в таблице 2, нужно разделить на  $\sqrt{3}$ . Для обеспечения устойчивости численного решения временной шаг, используемый в WRF-ARW, должен давать число Куранта меньше максимально допустимого. Таким образом, для нашего случая трёхмерной адвекции временной шаг должен удовлетворять следующему уравнению:

$$\Delta t_{max} < \frac{Cr_{theory}}{\sqrt{3}} * \frac{\Delta x}{u_{max}} \quad (2,4)$$

где  $Cr_{theory}$  – максимально допустимые значения числа Куранта, приведённые в таблице 2,  $u_{max}$  – максимальная скорость, которая ожидается при моделировании,  $\Delta x$  – шаг по пространству.

Для нашего случая  $Cr_{theory}=1,08$ ,  $\Delta x=9000$  м. Поскольку ветер в струйных течениях может достигать скорости 100 м/с, примем  $u_{max}=100$  м/с. Получив по формуле (2.4) значение  $\Delta t_{max} < 56$  с., определимся с выбором шага по времени. Чтобы обеспечить буфер безопасности, обычно выбирают шаг по времени, который несколько меньше  $\Delta t_{max}$ . В нашем случае примем  $\Delta t=50$  с.

На основании имеющегося у автора ВКР опыта работы с некоторыми схемами параметризаций в WRF-ARW, для тестового моделирования были выбраны следующие параметризации.

1) Параметризация микрофизических процессов:

- схема Линя.

2) Параметризация конвекции:

- схема Каина-Фрича.

3) Параметризация длинноволновой радиации:

- схема RRTM.

4) Параметризация коротковолновой радиации:

-схема Дудья.



5) Пограничный слой:

- схема университета Ёнсей.

6) Приземный слой:

- схема MM5.

7) Процессы на поверхности и в почве при помощи параметризации:

-схема Noah.

8) Микрофизика города:

-не использовалась.

## 2.2. Результаты тестового моделирования.

Для верификации результатов моделирования были рассчитаны следующие статистические критерии:

1) Средняя за месяц абсолютная ошибка моделирования:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Y_i - \hat{Y}_i)| \quad (2.5)$$

2) Среднеквадратическая ошибка моделирования:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2.6)$$

3) Коэффициент корреляции между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{av})(\hat{Y}_i - \hat{Y}_{av})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{av})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_{av})^2}} \quad (2.7)$$

где  $Y_i$  – смоделированное значение температуры,  $\hat{Y}_i$  – фактическое значение температуры, зарегистрированное на метеостанции,  $Y_{av}$  – среднее за месяц значение смоделированной температуры,  $\hat{Y}_{av}$  – среднее за месяц фактическое значение температуры, зарегистрированное на метеостанции,  $n$  – объем выборки (249).

А также из массива данных было выбрано максимальное осреднённое за сутки отклонение модельных данных от данных наблюдений на метеостанции (max) и посчитано количество дней, когда прогноз был неудовлетворительным

Метеорологическая станция в Санкт-Петербурге имеет следующие координаты:  $60^{\circ}$  с.ш.,  $30,3^{\circ}$  в.д. Поэтому для верификации результатов моделирования на вычислительной сетке была выбрана точка с соответствующими координатами.

График месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры представлен на рисунке 3.

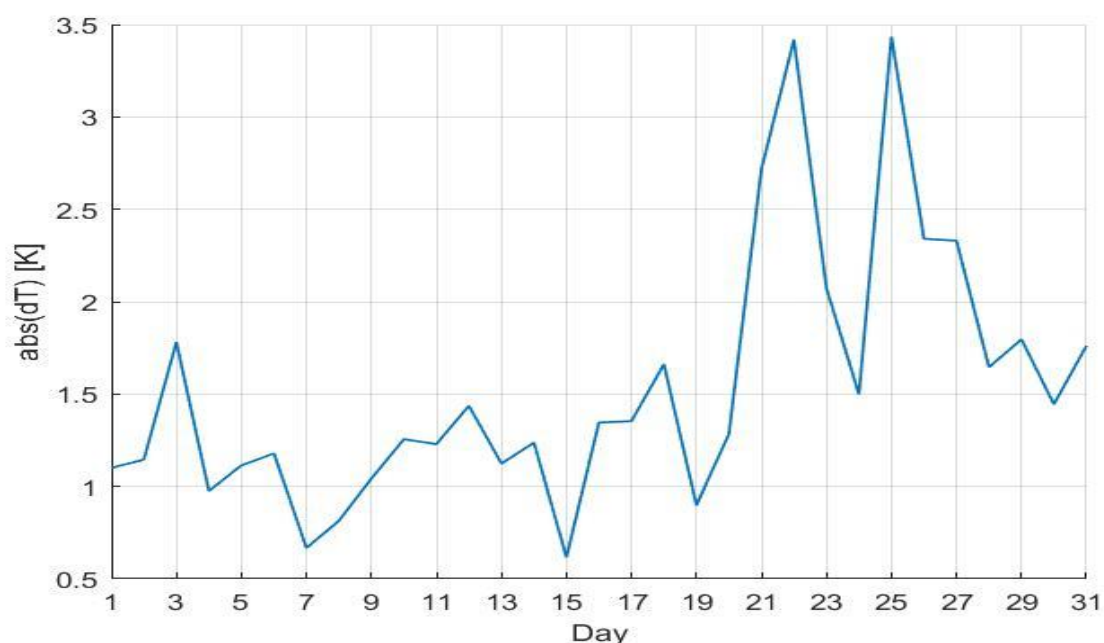


Рисунок 3. График месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры.

На основании того, что в настоящее время приемлемыми считаются прогнозы температуры у земли с погрешностью не более 2-х градусов в среднем за сутки [5], можно сделать вывод о том, что прогноз температуры воздуха по модели WRF-ARW за 21,22,23,25, 26 и 27 июля можно признать неудовлетворительным. В остальные же дни ошибка моделирования не превышала 2 градуса, и, следовательно, прогноз был успешен.

Далее на рисунке 4 представлен график дневного хода осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры в 00, 03, 06, 12, 15, 18, 21 UTC.

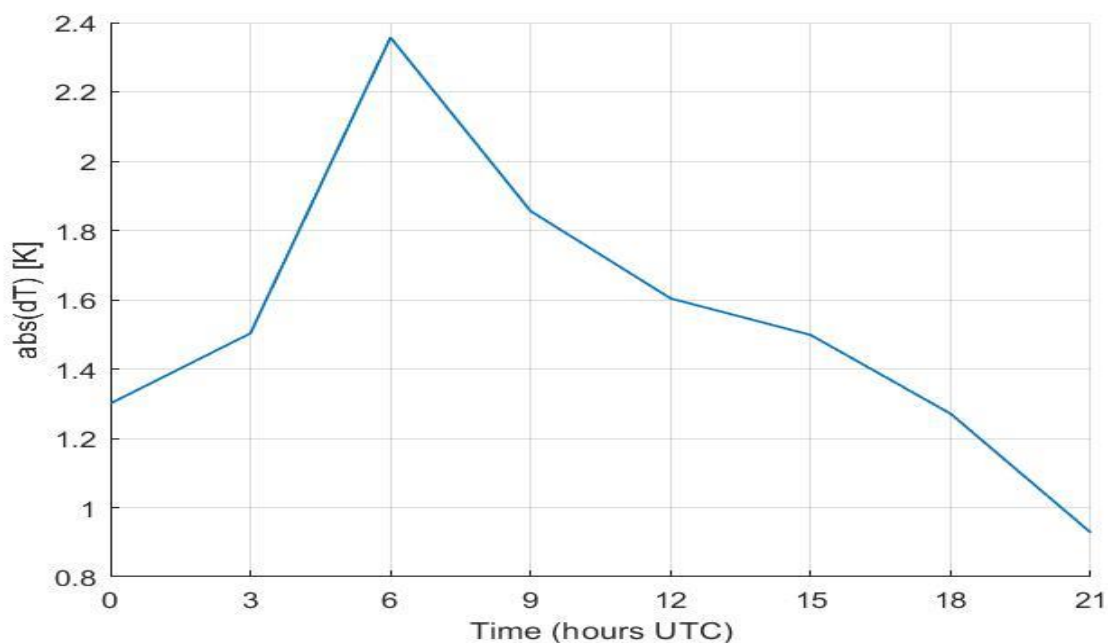


Рисунок 4. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры.

Анализируя график, представленный на рисунке 4, можно сделать вывод о том, что абсолютные отклонения модельных данных от данных наблюдений на метеостанции принимали максимальные значения в 6 часов по UTC. В утренние и дневные часы прогноз был несколько хуже, чем в вечерние и ночные.

Далее в таблице 3 представлены, рассчитанные для температуры значения средней за месяц абсолютной ошибки моделирования ( $\delta$ ), среднеквадратической ошибки моделирования ( $\sigma$ ), коэффициента корреляции между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции ( $r$ ), максимальное осреднённое за сутки отклонение модельных данных от данных наблюдений на метеостанции ( $\max$ ) и количество дней, когда прогноз был неудовлетворительным.

$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	$r$	$\max$ [K]	Кол-во дней, когда прогноз был неудовлетворительным
1.55	2.06	0.85	3.43	6

Таблица 3. Рассчитанные статистические критерии для тестовой конфигурации модели.

Как видно из таблицы 3, среднее за месяц абсолютное отклонение температуры воздуха не превышает 2 градуса, из чего можно сделать вывод о том, что в большинстве

случаев прогноз приземной температуры воздуха был успешен. Поскольку коэффициент корреляции Пирсона оказался больше 0.7, то можно сделать вывод о сильной взаимосвязи модельных данных и данных наблюдений на метеостанции.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что модель при данной комбинации параметризаций удовлетворительно справилась с прогнозом температуры в большинстве случаев, но были случаи, когда отклонение модельных данных от данных наблюдений на метеостанции превышало 2 градуса, и модель справилась неудовлетворительно. Улучшению качества моделирования температуры путём подбора оптимальной комбинации параметризаций будет посвящена следующая глава.

### **Глава 3. Подбор оптимальной комбинации схем параметризаций процессов подсеточного масштаба.**

В этой главе была поставлена цель улучшить качество прогноза приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург с помощью модели WRF-ARW путём подбора оптимальной комбинации схем параметризации процессов подсеточного масштаба. Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

- 1) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации микрофизических процессов.
- 2) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации конвекции.
- 3) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации длинноволновой радиации.
- 4) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации коротковолновой радиации.
- 5) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из комбинаций схем параметризации пограничного и приземного слоёв.
- 6) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации почвенного слоя.
- 7) Подбор и доказательство преимущества выбора одной из схем параметризации микрофизики города.

#### **3.1. Подбор оптимальной схемы параметризации микрофизических процессов.**

Параметризации микрофизики описывают процессы, связанные с водяным паром, облаком и осадками. В текущей версии WRF-ARW микрофизика выполняется в конце шага по времени как процесс корректировки значений, рассчитанных на этом шаге, и поэтому не прогнозирует, а непосредственно обновляет переменные состояния. Это объясняется тем, что корректировка конденсации должна гарантировать точность конечного баланса насыщения для обновленной температуры и влажности. В настоящее время процесс осадкообразования учитывается внутри отдельных микрофизических модулей, и для предотвращения неустойчивости при расчете вертикального потока осадков допускается либо меньший временной шаг, либо используется схема Лагранжа. Корректировка насыщения также включена в параметризацию микрофизики. Различные варианты параметризаций

микрофизики имеют различное количество переменных, в зависимости от включения в них частиц ледяной фазы и смешанной фазы. Частицы смешанной фазы возникают в результате взаимодействия частиц льда и воды (например, град, крупа). Как правило, при размерах сетки менее 10 км, где могут быть восходящие потоки, следует использовать схемы, учитывающие частицы смешанной фазы, особенно в ситуациях конвекции и обледенения.

В этом разделе была подобрана схема параметризации микрофизических процессов, при которой прогноз приземной температуры воздуха для Санкт-Петербурга наиболее успешен. Помимо уже использованной при тестовом запуске схемы Линя, в данном разделе были использованы ещё 2 схемы параметризации микрофизических процессов. Это параметризация WSM6 и параметризация Томпсона. Ниже более подробно описываются все эти 3 параметризации.

#### Параметризация Линя.

Параметризация Линя содержит шесть классов гидрометеоров: водяной пар, облачную воду, дождь, облачный лед, снег и крупу. Эта параметризация основана на работах (Lin et al., 1983) [6] и (Rutledge and Hobbs, 1984) [7]. В оригинальные работы были внесены некоторые модификации, включая конденсационное приспособление, рассчитывающееся по методике, предложенной (Tao et al., 1989) [8], и скорость осаждения льда. По сравнению с параметризацией Кесслера, обработка ледяных процессов в этой и во всех других параметризациях микрофизики повышает их уровень сложности и делает их более подходящими для использования в научных исследованиях. Схема была взята из модели облачности университета им. Пердью, а подробную информацию о ней можно найти в работе (Chen and Sun, 2002) [9].

#### Параметризация WSM6.

Параметризация WSM 6, также как и параметризация Линя содержит 6 типов гидрометеоров: водяной пар, облачную воду, дождь, облачный лед, снег и крупу. Некоторые, связанные с крупой определения, основаны на работе (Lin et al., 1983) [6], но поведение в ледяной фазе сильно отличается из-за изменений, сделанных в работе (Hong et al., 2004) [10]. Вводится новый метод представления скоростей падения частиц смешанной фазы для частиц снега и крупы путем присвоения им одной скорости падения, взвешенной по соотношениям

смещения, и эта скорость падения применяется как к процессам седиментации, так и к процессам аккреции (Dudhia et al., 2008) [11]. Порядок расчета процессов оптимизирован таким образом, чтобы уменьшить чувствительность схемы к шагу по времени в модели. Конденсационное приспособление рассчитывается по методике (Dudhia, 1989) [12] и (Hong et al., 1998) [13], в которой отдельно рассматривается насыщение над водой и льдом, а не комбинация насыщений, как это имеет место в параметризации Линя.

#### Параметризация Томпсона.

Схема Томпсона была разработана для среднеширотных конвективных, орографических и снегопадных условий, особенно для тех масштабов, когда применяется параметризация конвекции. Она была обновлена и описана в работе (Thompson et al., 2008) [14]. В ней 6 переменных, описывающих гидрометеоры, так же, как и в параметризации WSM6, но присутствует дополнительно концентрация ледяных частиц в качестве прогностической переменной. Эта схема используется в системе прогнозирования RAP/HRRR (Rapid Refresh/ High-Resolution Rapid Refresh). Радиусы льда, снега и облачных капель, аэрозолей передаются в схемы излучения RRTMG для расчета оптической глубины. Также диагностируется отражательная способность.

Ниже представлены результаты верификации моделирования с использованием всех вышеописанных схем параметризации микрофизических процессов. А также по результатам верификации выбрана наиболее оптимальная схема параметризации микрофизики.

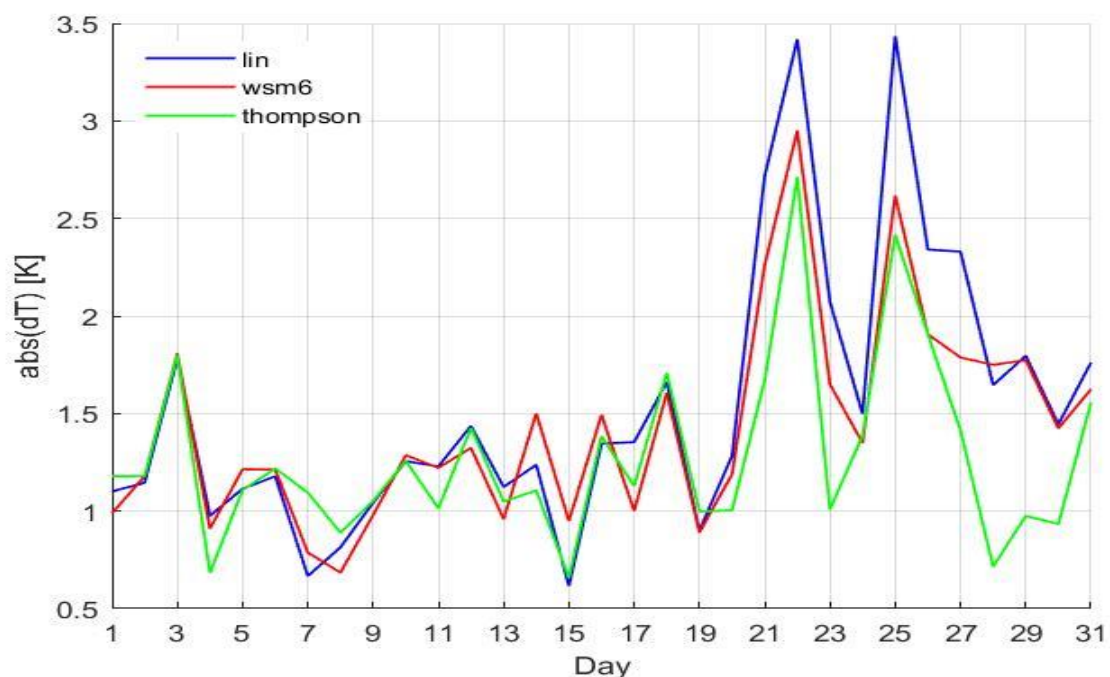


Рисунок 5. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании параметризаций микрофизики Линя (красный), WSM6 (синий), Томпсона (зелёный).

На рисунке 5 в период с 01.07. по 19.07 сложно выявить преимущество использования одной из схем параметризаций, однако в период с 20.07 по 31.07 параметризация Томпсона показывает лучшие результаты относительно других параметризаций. Из графиков, представленных на рисунке 5, видно, что при использовании схем параметризации WSM 6 и Томпсона уменьшается максимальная ошибка моделирования относительно параметризации Линя (22.07 и 25.07). При использовании параметризации WSM6 и Томпсона отмечается уменьшение количества дней, когда прогноз приземной температуры был неудовлетворительным. Так при использовании параметризации Томпсона прогноз приземной температуры был неудовлетворительным только 22.07 и 25.07.



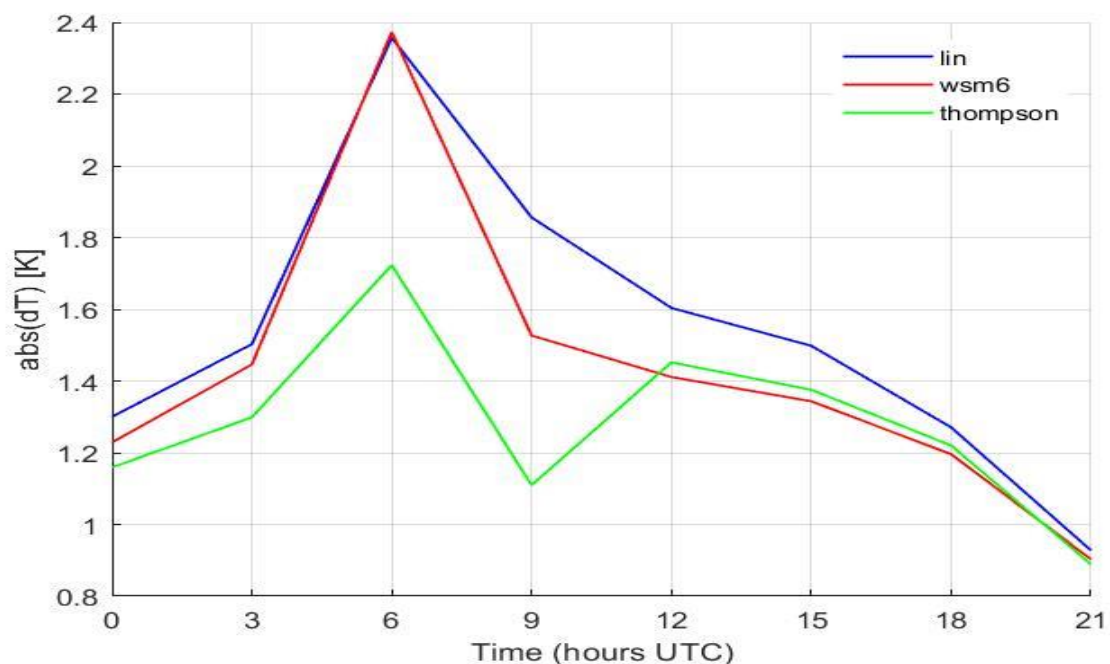


Рисунок 6. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании параметризаций микрофизики Линя (красный), WSM6 (синий), Томпсона (зелёный).

На графиках, представленных на рисунке 6, хорошо заметно уменьшение абсолютных ошибок моделирования в утренние часы по UTC при использовании параметризации Томпсона. Особенно хорошо это заметно для 6 часов по UTC (9 часов по местному времени).

Далее в таблице 4 представлены статистические критерии, рассчитанные для рассматриваемых в этом разделе схем параметризации микрофизики.

Схема	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз был неудовлетворительным
Линя	1.55	2.06	0.85	3.43	6
WSM6	1.44	1.85	0.87	2.95	3
Томпсона	1.28	1.65	0.89	2.71	2

Таблица 4. Статистические критерии, рассчитанные для параметризаций микрофизики по схеме Линя, WSM6 и по схеме Томпсона.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 4, становится очевидным преимущество параметризации микрофизических процессов по схеме Томпсона, поскольку значения средней абсолютной и среднеквадратической ошибок моделирования

для этой схемы оказались наименьшими. Максимальная осреднённая за день абсолютная ошибка моделирования и количество дней, когда прогноз был неудовлетворительным также меньше для схемы параметризации Томпсона, а значение коэффициента корреляции Пирсона между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции, наоборот, больше для схемы параметризации Томпсона, чем для схем параметризации Линя и WSM6.

Выводы из раздела: ввиду вышеизложенного схему параметризации Томпсона следует признать наиболее оптимальной для прогноза приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург. Эта схема будет использоваться дальше при моделировании.

### **3.2. Подбор оптимальной схемы параметризации конвекции.**

Схемы параметризации конвекции отвечают за подсеточные эффекты конвективных и/или мелких облаков. Схемы предназначены для представления вертикальных потоков, вызванных восходящими и нисходящими движениями воздуха, которые нельзя представить на сетке. Они работают только в отдельных столбах атмосферы, где срабатывает схема, и описывают вертикальные профили нагрева и увлажнения. Некоторые схемы дополнительно обеспечивают тенденции поля облаков и осадков в столбе атмосферы, а некоторые обеспечивают тенденции импульса за счет конвективного переноса импульса. Все схемы обеспечивают конвективную составляющую поверхностных осадков.

Параметризации конвекции следует применять теоретически только при использовании грубых сеток (сеток с шагом более 10км), однако иногда они могут быть полезны при шаге сетки 4-10 км. В нашем случае шаг сетки составляет 9 км. И подбор параметризаций конвекции представляется необходимым.

В данной работе рассмотрены 3 параметризации конвекции: Каина-Фрича, Беттса-Миллера-Янича и Грелла-Девени. Ниже дано описание этих схем.

#### **Модифицированная схема Каина-Фрича (КФ).**

Модифицированная версия схемы Каина-Фрича основана на работах (Kain and Fritsch, 1990) [15] и (Kain and Fritsch, 1993) [16], но была модифицирована на основе тестирования в модели Eta. Как и в исходной схеме КФ, в ней используется простая облачная модель с

влажными восходящими и нисходящими потоками, включая эффекты истечения из облака и вовлечения в него, а также относительно простая микрофизика.

### Параметризация Беттса-Миллера-Янича (БМЯ).

Схема Беттса-Миллера-Янича (Janjic, 1994) [17] была получена из схемы конвективного приспособления Беттса-Миллера (БМ) (Betts and Miller, 1986) [18]. Однако схема БМЯ отличается от схемы БМ несколькими важными аспектами. Профили глубокой конвекции и время релаксации являются переменными и зависят от эффективности облака-безразмерного параметра, характеризующего конвективный режим (Janjic, 1994) [17]. Эффективность облака зависит от изменения энтропии, количества осадков и средней температуры облака. Мелкий конвективный профиль влажности выводится из требования, чтобы изменение энтропии было небольшим и неотрицательным (Janjic, 1994) [17]. Схема БМЯ оптимизировалась в течение многих лет эксплуатационного применения в NCEP, так что, в дополнение к описанным концептуальным различиям, многие детали и/или значения параметров отличаются от тех, которые рекомендованы в работах (Betts and Miller, 1986) [18]. В последнее время предпринимаются попытки усовершенствовать схему для более высоких горизонтальных разрешений, прежде всего за счет модификации запускающего механизма.

### Ансамбль Грелла-Девени.

(Grell and Devenyi, 2002) [19] предложили ансамблевую параметризацию конвекции, в которой рассчитывается множество параметризаций в одном узле сетки, а затем результаты осредняются и этот осредненный эффект конвекции учитывается на сеточном уровне. Усреднение может производиться с весами для оптимизации схемы, но по умолчанию используется равный вес.

Ниже представлены результаты верификации моделирования с использованием всех вышеописанных параметризаций конвекции. А также по результатам верификации выбрана наиболее оптимальная из них.

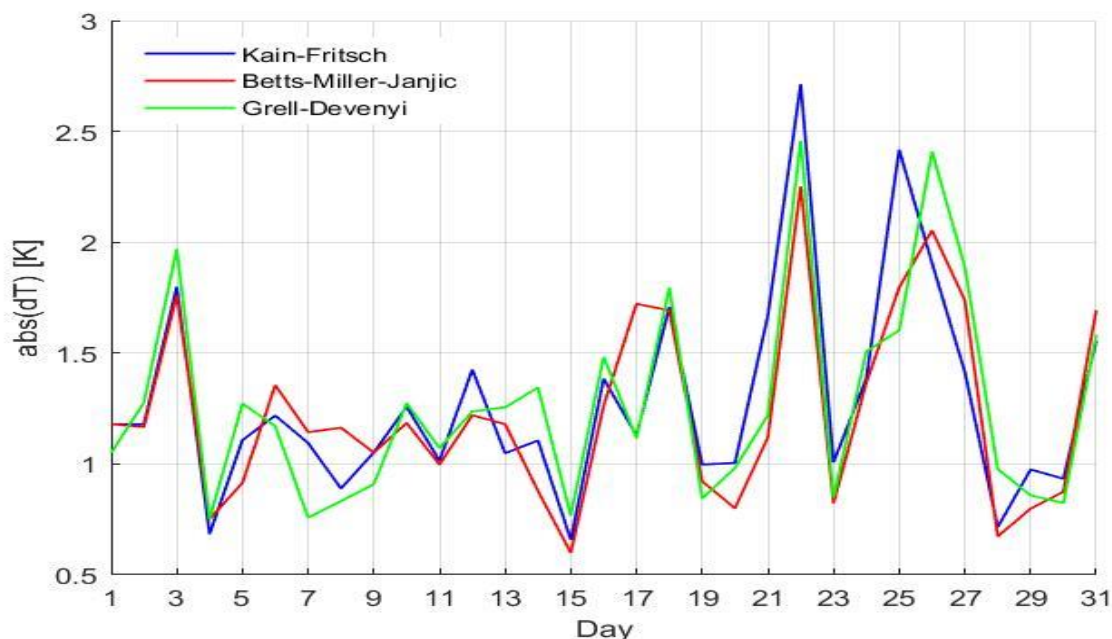


Рисунок 7. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации конвекции Каина-Фрича (синий), Беттса-Миллера-Янича (красный) и ансамблевой схемы параметризации Грелла-Девени (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 7, можно сделать вывод о том, что максимальная осреднённая за сутки абсолютная ошибка прогноза при использовании схем параметризации Беттса-Миллера-Янича и Грелла-Девени уменьшилась относительно результатов, полученных при моделировании со схемой Каина-Фрича. В первую очередь улучшения заметны для параметризации Беттса-Миллера-Янича. Но для всех трёх параметризаций прогноз приземной температуры воздуха 22.07 остаётся неудовлетворительным. За 25.07 прогноз с использованием схем Беттса-Миллера-Янича и Грелла-Девени можно признать удовлетворительным, но 26.07 отмечается некоторое ухудшение качества прогноза относительно параметризации Каина-Фрича.

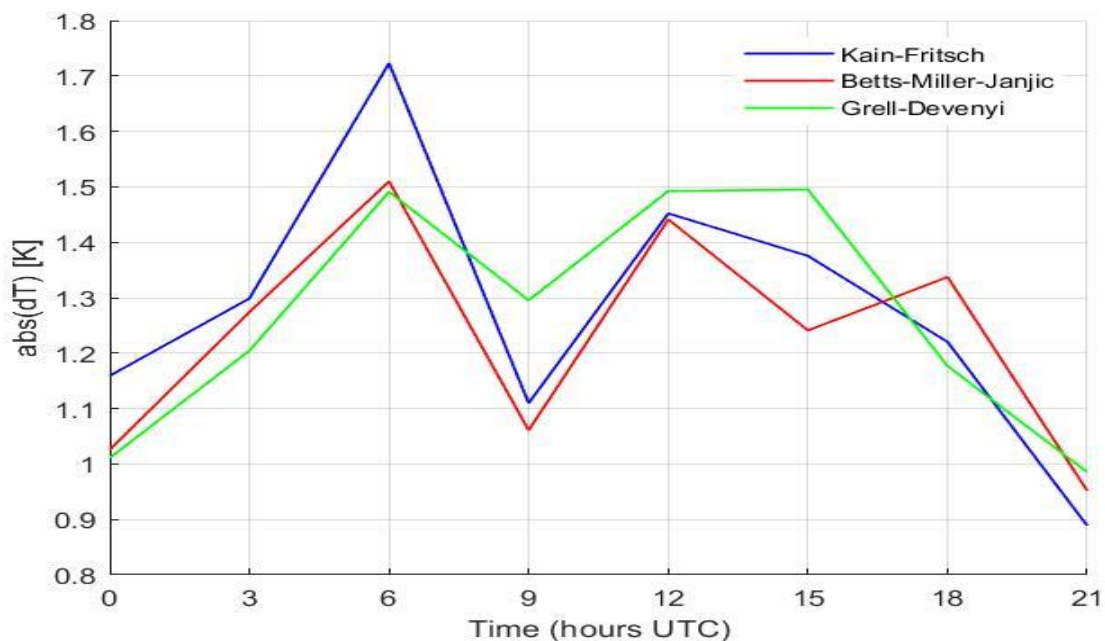


Рисунок 8. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации конвекции Каина-Фрича (синий), Беттса-Миллера-Янича (красный) и ансамблевой схемы параметризации Грелла-Девени (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 8, можно сделать вывод о том, что абсолютная ошибка прогноза в 6 UTC при использовании схем параметризации Беттса-Миллера-Янича и Грелла-Девени уменьшилась относительно результатов, полученных при использовании схемы Каина-Фрича. Но для параметризации Грелла-Девени отмечается ухудшение прогноза в дневные часы по местному времени (с 9 по 15 UTC).

Далее в таблице 5 представлены статистические критерии, рассчитанные для схем параметризации конвекции, рассматриваемых в этом разделе.

Схема	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
Каина-Фрича	1.28	1.65	0.89	2.71	2
Беттса-Миллера-Янича	1.24	1.60	0.90	2.25	2
Грелла-Девени	1.28	1.64	0.89	2.46	2

Таблица 5. Рассчитанные статистические критерии для параметризаций конвекции по схеме Каина-Фрича, Беттса-Миллера-Янича и по схеме ансамблевой параметризации Грелла-Девени.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 5, можно сделать вывод о том, что средняя абсолютная и среднеквадратическая ошибки моделирования для параметризации по схеме Беттса-Миллера-Янича оказались несколько меньше, чем для остальных двух схем параметризации конвекции, а коэффициент корреляции Пирсона между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции, наоборот, несколько больше. Максимальная осреднённая за сутки абсолютная ошибка моделирования для схемы параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича меньше, чем для двух других.

Выводы из раздела: резюмируя всё вышесказанное, схему Беттса-Миллера-Янича следует признать наиболее оптимальной для моделирования приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург. Эта схема будет использоваться дальше в моделировании.

### 3.3. Подбор оптимальной схемы параметризации длинноволновой радиации.

Параметризации длинноволновой радиации описывают влияние длинноволновой радиации на температуру атмосферы. Длинноволновое излучение включает инфракрасное или тепловое излучение, поглощаемое и испускаемое газами и поверхностями. Восходящий длинноволновый радиационный поток от земли определяется поверхностной излучательной способностью, которая в свою очередь зависит от типа землепользования, а также от температуры грунта (поверхности).

В атмосфере длинноволновое и коротковолновое излучение реагирует на модельно-прогнозируемое распределение облаков и водяного пара, фракцию облаков, а также на заданные концентрации углекислого газа и озона. Некоторые схемы могут работать с аэрозолями. В настоящее время все радиационные схемы в WRF являются столбчатыми (одномерными), поэтому каждый столбец обрабатывается независимо.

В этом разделе будет осуществлён подбор оптимальной схемы параметризации длинноволновой радиации. Здесь рассмотрены 3 схемы параметризации длинноволновой радиации: RRTM, RRTMG и параметризация по новой схеме центра космических полётов им. Годдарда (NASA). Более подробная информация об этих трёх схемах приведена ниже.

#### Параметризация по схеме RRTM (The Rapid Radiative Transfer Model).

Схема параметризации длинноволновой радиации взята из модели MM5. Она основана на работе (Mlawer et al., 1997) [20] и представляет собой спектрально-полосную схему с использованием метода коррелированных коэффициентов поглощения (коррелированных-k), который описан в работе (R.M. Goody et al., 1989) [21]. В этой схеме используются заранее заданные таблицы для точного представления длинноволновых процессов, вызванных водяным паром, озоном и CO<sub>2</sub>, а также для учета оптической глубины облака.

#### Параметризации по схемам RRTMG (The Rapid Radiative Transfer Model for GCMs).

(длинноволновая (RRTMG-LW) и коротковолновая радиация (RRTMG-SW)).

RRTMG представляет собой современную широко используемую радиационную модель для погодных и климатических применений как в глобальном, так и в региональном масштабе. В схеме используются спектральные полосы и метод интегрирования распределения коэффициентов поглощения (k-распределения) с таблицами поиска для повышения эффективности. Для облаков с облачными фракциями, изменяющимися по вертикали, модель использует аппроксимацию независимых столбцов Монте-Карло (MCICA) вместе с предположением о максимальном случайном перекрытии по умолчанию (также доступны случайные, максимальные, экспоненциальные и экспоненциально-случайные методы). Модель также может использовать эффективные радиусы облачной воды, льда и снега, если они получены из схемы параметризации микрофизики, в противном

случае модель будет использовать свои собственные данные. Модель RRTMG включает в себя влияние парниковых газов и имеет возможность для их изменения во времени для климатических прогнозов. Для озона существует глобальная ежемесячная климатологическая опция, которая исходит из данных CAM3. Эффекты аэрозолей могут задаваться при использовании глобальной ежемесячной климатологии (Tegen или Eidhammer/Thompson) или могут исходить из оптических свойств, вычисленных с помощью WRF-Chem, или могут быть заданы/введены другими способами. Длинноволновая схема была модифицирована для верхней части атмосферы для учета значительного нисходящего потока, исходящего сверху модельной вершины (Cavallo et al., 2011) [22].

Параметризации по новым схемам центра космических полётов им. Годдарда (NASA) (длинноволновая (Goddard-LW) и коротковолновая радиация (Goddard-SW)).

Эти схемы спектральных полос, предоставленные NASA Goddard, являются передовыми и относительно эффективными, но в то же время точными. Коротковолновые и длинноволновые схемы основаны на работах (Chou and Suarez, 1999) [23] и (Chou et al., 2001) [24] соответственно. Они не взаимодействуют с WRF-Chem, но для аэрозольных эффектов. может быть использована двумерная информация об аэрозольной оптической глубине. Эти схемы включают в себя учёт влияния парниковых газов и используют климатологические профили озона. Фракции облаков в слоях также учитываются для низких, средних и высоких слоёв максимально перекрывающимися внутри этих сгруппированных слоев и случайным образом между ними. Новейшая версия схемы излучения центра космических полётов им. Годдарда (Matsui et al., 2018) [25] включает в себя три основных улучшения. Во-первых, была включена согласованная по размеру, форме и спектру излучения база данных одиночного рассеяния (Yang et al., 2013) [26] для представления гидрометеорологически согласованных оптических свойств (включая дождь, снег, крупу и град). Во-вторых, база данных молекулярного поглощения была обновлена с HITRAN 1996 по HITRAN 2012, что уменьшает смещения для потока излучения ясного неба. В-третьих, радиационный код был векторизован для повышения эффективности вычислений.

Ниже представлены результаты верификации моделирования с использованием описанных выше схем параметризации длинноволновой радиации.



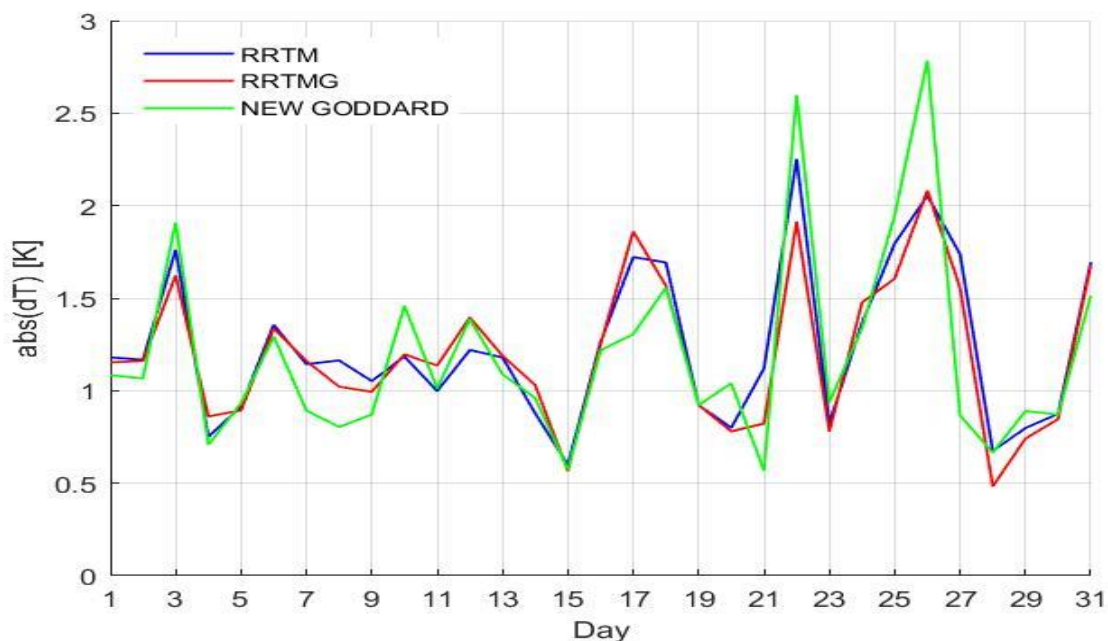


Рисунок 9. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации длинноволновой радиации RRTM (синий), RRTMG-LW (красный) и Goddard-LW (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 9, можно сделать вывод о том, что использование схемы Goddard-LW приводит к увеличению максимальной осреднённой за день абсолютной ошибки моделирования (22.07 и 26.07) относительно двух других схем параметризации. Максимальная средняя за день абсолютная ошибка моделирования меньше всего для схемы параметризации RRTMG-LW.

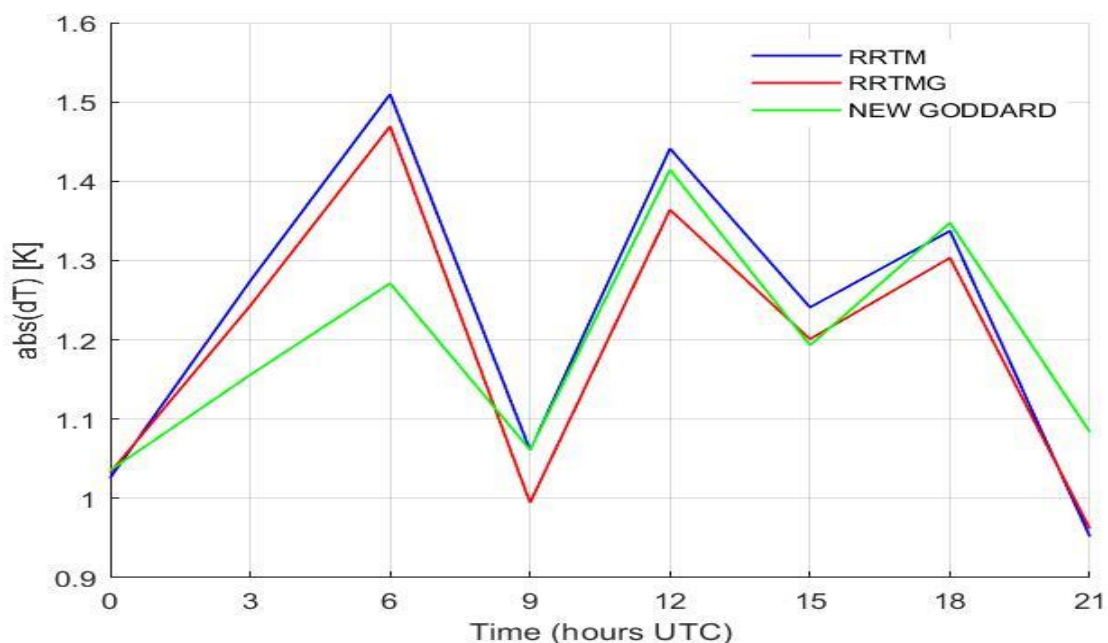


Рисунок 10. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации длинноволновой радиации RRTM (синий), RRTMG-LW (красный) и Goddard-LW (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 10, можно сделать вывод о том, что моделирование с использованием схемы Goddard-LW приводит к уменьшению абсолютных ошибок моделирования в 6 часов по UTC относительно трёх других схем параметризации. Также использование этой схемы уменьшает амплитуду дневного хода абсолютных ошибок моделирования.

Ниже в таблице 6 представлены статистические критерии, рассчитанные для схем параметризации длинноволновой радиации, рассматриваемых в этом разделе.

Схема	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
RRTM	1.24	1.60	0.90	2.25	2
RRTMG-LW	1.20	1.54	0.90	2.08	1
Goddard-LW	1.20	1.54	0.90	2.78	2

Таблица 6. Рассчитанные статистические критерии для схем параметризации длинноволновой радиации RRTM, RRTMG-LW и Goddard-LW.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 6, можно сделать вывод о том, что для схем параметризации длинноволновой радиации RRTMG-LW и Goddard-LW средние за месяц абсолютные и среднеквадратические ошибки моделирования оказались меньше, чем для схемы параметризации RRTM. Коэффициент корреляции Пирсона для всех трёх рассматриваемых схем одинаковый. Максимальная за месяц ошибка моделирования оказалась меньше всего для схемы параметризации RRTMG-LW. Количество случаев, когда ошибка моделирования была больше 2 градусов и, следовательно, прогноз можно признать неудовлетворительным также меньше всего для схемы параметризации RRTMG-LW.

Выводы из раздела: схему параметризации длинноволновой радиации RRTMG-LW можно признать наиболее оптимальной для моделирования приземной температуры в г. Санкт-Петербург, поскольку значение максимальной осреднённой за день абсолютной ошибки моделирования и количество дней, когда прогноз можно признать неудовлетворительным, меньше именно для этой схемы параметризации. Эта схема будет использоваться дальше в моделировании.

### 3.4. Подбор оптимальной схемы параметризации коротковолновой радиации.

Параметризации коротковолновой радиации описывают влияние коротковолновой радиации на температуру атмосферы. Коротковолновое излучение включает в себя видимые и соседние к ним длины волн, составляющие солнечный спектр. Следовательно, единственным источником является Солнце, излучение от которого поглощается, отражается и рассеивается в атмосфере и на поверхностях. Для коротковолнового излучения восходящий поток - это отражение, обусловленное альбедо поверхности. При высоком разрешении схемы коротковолнового излучения могут представлять эффекты наклона поверхности, которые изменяют поверхностный нисходящий коротковолновый поток в соответствии с углами наклона.

В этом разделе будет осуществлён подбор оптимальной схемы параметризации коротковолновой радиации. Здесь рассмотрены три схемы параметризации коротковолновой радиации: Дудья, RRTMG-SW и Goddard-SW. Две последние схемы были уже описаны в предыдущем разделе. Ниже дано описание схемы параметризации Дудья.

#### Параметризация Дудья.

При расчете коротковолновой радиации учитывается поглощение и рассеяние облаками, рассеяние и поглощение водяным паром при отсутствии облаков. Нагревание атмосферы коротковолновой радиацией происходит за счет ее поглощения облаками и водяным паром.

Ниже представлены результаты верификации моделирования с использованием описанных выше схем параметризации коротковолновой радиации.

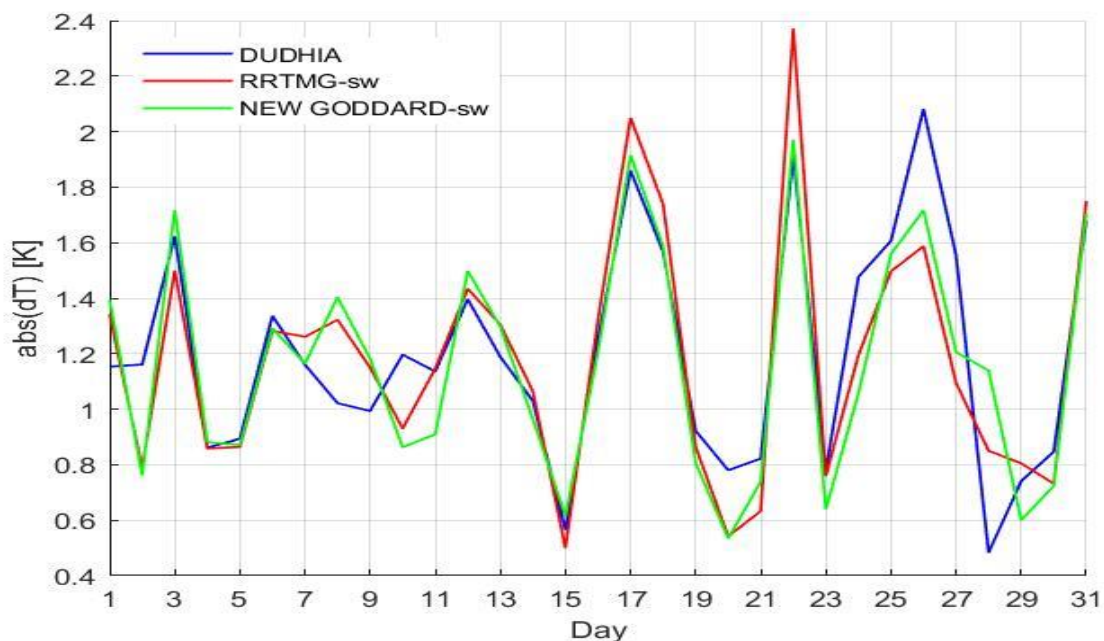


Рисунок 11. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации коротковолновой радиации Дудья (синий), RRTMG-SW (красный) и Goddard-SW (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 11, можно сделать вывод о том, что использование схемы параметризации коротковолновой радиации RRTMG-SW приводит к увеличению максимальной осреднённой за день абсолютной ошибки моделирования относительно двух других. Прогноз с использованием схемы параметризации коротковолновой радиации RRTMG-SW можно признать неуспешным за 17.07. и 22.07., а с использованием схемы параметризации Дудья за 26.07. Моделирование приземной температуры воздуха с использованием схемы параметризации коротковолновой радиации Goddard-SW можно признать удовлетворительным на протяжении всего периода.

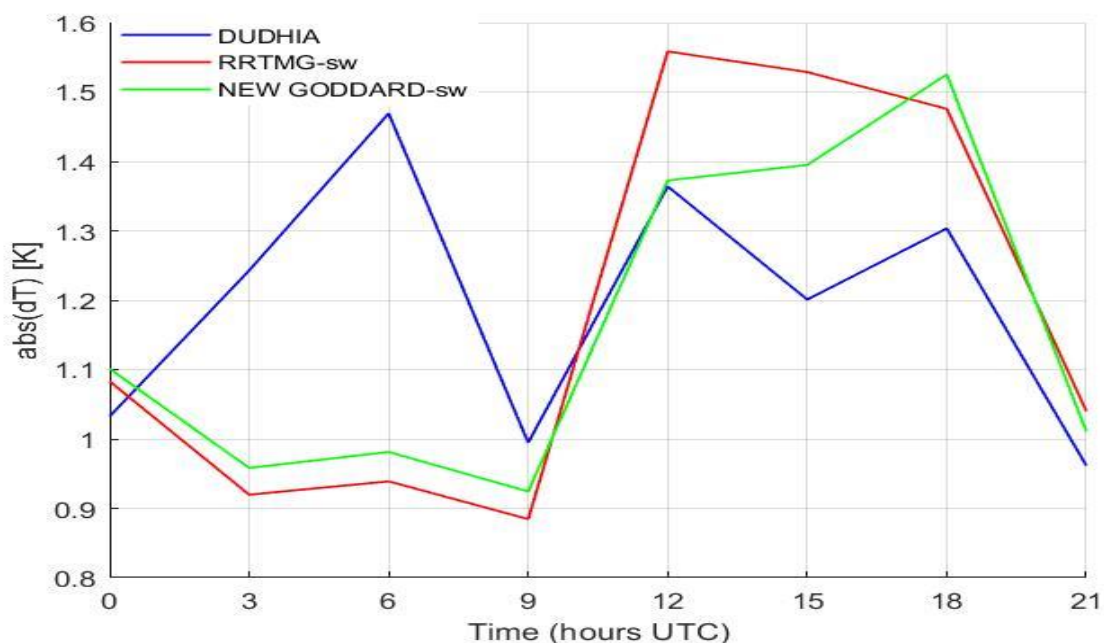


Рисунок 12. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации коротковолновой радиации Дудья (синий) и RRTMG-SW (красный) и Goddard-SW (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 12, можно сделать вывод о том, что в первой половине дня по UTC в целом было успешней моделирование с использованием схем параметризации коротковолновой радиации RRTMG-SW и Goddard-SW, но во второй половине дня схема параметризации Дудья показывает лучшие результаты.

Ниже в таблице 7 представлены статистические критерии, рассчитанные для схем параметризации коротковолновой радиации, рассматриваемых в этом разделе.

Схема	$\delta$	$\sigma$	r	max	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
Дудья	1.20	1.54	0.90	2.08	1
RRTMG-SW	1.18	1.55	0.91	2.37	2
Goddard-SW	1.16	1.53	0.91	1.97	0

Таблица 7. Рассчитанные статистические критерии для схем параметризации коротковолновой радиации Дудья, RRTMG-SW и Goddard-SW.

Анализируя представленные в таблице 7 статистические критерии, видно, что средние за месяц абсолютная и среднеквадратическая ошибки моделирования для схемы параметризации коротковолновой радиации Goddard-SW несколько меньше, чем для схем параметризаций Дудья и RRTMG-SW. Коэффициент корреляции Пирсона между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции получился несколько больше для схем параметризации коротковолновой радиации RRTMG-SW и Goddard-SW. Значение максимальной осреднённой за день абсолютной ошибки моделирования и количество дней, когда прогноз следует принять неудовлетворительным, оказались меньше для схемы параметризации коротковолновой радиации Goddard-SW.

Выводы из раздела: на основании рассмотренных выше статистических критериев новую схему параметризации коротковолновой радиации центра космических полётов им. Годдарда следует признать наиболее оптимальной для моделирования приземной температуры в г. Санкт-Петербург. Эта схема будет использоваться дальше в моделировании.

### **3.5. Подбор оптимальной комбинации схем параметризаций пограничного и приземного слоя.**

Слой атмосферы от подстилающей поверхности до высоты, на которой можно пренебречь силой трения (т. е. слой, где существенно влияние силы трения), называется планетарным пограничным слоем (ППС) атмосферы [27].

Слой вблизи поверхности земли (толщиной около 10—100 м) часто называется приземным слоем (или подслоем). Здесь, как правило, наблюдаются максимальные градиенты метеорологических величин. Важной особенностью приземного слоя, в значительной мере оправдывающей выделение его в рамках пограничного слоя, является относительное постоянство по высоте турбулентных потоков [27].

Схемы параметризации приземного слоя вычисляют скорости трения и коэффициенты обмена, которые позволяют рассчитывать поверхностные потоки тепла и влаги по почвенным моделям и поверхностное напряжение в схеме ППС. Над водными поверхностями поверхностные потоки и поверхностные диагностические поля вычисляются в самой схеме приземного слоя. Схемы приземного слоя не описывают тенденции (изменение) температуры, влажности и горизонтального импульса, а предоставляют только информацию об устойчивости приземного слоя для схем почвенного слоя и ППС.

Схемы параметризации ППС отвечают за вертикальные подсеточные потоки за счет вихревых переносов во всём атмосферном столбе, а не только в пограничном слое. Когда схема ППС активирована, явная вертикальная диффузия деактивируется с предположением, что схема ППС будет обрабатывать этот процесс. Схемы ППС определяют профили потока в пределах хорошо перемешанного пограничного слоя и устойчивого слоя и, таким образом, обеспечивают атмосферные тенденции температуры, влажности (включая облака) и горизонтального импульса во всём атмосферном столбе. Большинство схем ППС учитывают сухое перемешивание, но могут также включать эффекты насыщения в вертикальную устойчивость, которая определяет перемешивание. Схемы одномерны и предполагают, что есть чёткое разделение по масштабам между подсеточными вихрями и вихрями, представленными на вычислительной сетке. Параметризация ППС должна использоваться, когда шаг сетки составляет более 500 метров. Если шаг сетки меньше 500 метров, то атмосферные вихри уже могут быть описаны на вычислительной сетке. В нашем случае шаг сетки существенно больше 500 метров и использование параметризации ППС представляется необходимым.

В этом разделе были использованы 3 схемы параметризации ППС: схема университета Ёнсей (YSU), Меллора-Ямады-Янича (MYJ), и Bougeault-Lacarrère (BouLac). Все эти схемы параметризации работают только с определёнными схемами параметризации приземного слоя. Поэтому в этом разделе были ещё рассмотрены 2 схемы параметризации приземного слоя: модифицированная MM5 и Eta.

Ниже в таблице 8 приведены и пронумерованы все возможные комбинации схем параметризации пограничного и приземного слоёв.

№ комбинации	Пограничный слой	Приземный слой
1	YSU	MM5
2	MYJ	Eta
3	BouLac	MM5
4	BouLac	Eta

Таблица 8. Возможные комбинации схем параметризаций пограничного и приземного слоя.

Схемы параметризации ППС MYJ и BouLac (№2, №3, №4) предназначены для использования со схемами параметризации микрофизики города.

Ниже дано более подробное описание схем параметризации пограничного и приземного слоя, рассматриваемых в этом разделе.



### Параметризация ППС по схеме YSU.

Нелокальная К-схема имеет первый порядок замыкания с явным слоем вовлечения и параболическим К-профилем в неустойчивом смешанном слое. Вовлечение пропорционально потоку плавучести вблизи поверхности. Высота пограничного слоя определяется в основном профилем плавучести. Подробная информация доступна в работе (Hong et al., 2006) [28], включая анализ взаимодействия между пограничным слоем и физикой осадков. В работе (Jimenez and Dudhia, 2012) [29] в качестве опции к этой схеме ППС были добавлены топографические эффекты сопротивления и усовершенствованы в работе (Lorente-Plazas et al., 2016) [30]. В работе (Wilson and Fovell, 2018) [31] было добавлено радиационное нисходящее смешивание, которое способствует увеличению жизненного цикла стратокумулятусных облаков и тумана.

### Параметризация ППС по схеме MYJ.

Эта параметризация турбулентности в пограничном слое и свободной атмосфере (Janjic, 1996) [32] представляет собой вариант замыкания турбулентности уровня 2,5 (Mellor and Yamada, 1982) [33] для полного диапазона атмосферных турбулентных режимов. В этой реализации верхний предел накладывается на масштаб длины. Этот верхний предел зависит от кинетической энергии турбулентности (КЭТ), а также от плавучести и сдвига движущего потока. Дифференциальное уравнение производства/диссипации КЭТ решается итерационно. Эмпирические константы были также пересмотрены в работе (Janjic, 1996) [32].

### Параметризация ППС по схеме BouLac.

BouLac ППС (Bougeault and Lacarrere, 1989) [34] представляет собой схему 1,5 порядка (уровень 2,5) с прогностическим уравнением КЭТ для замыкания и методом вычисления масштаба длины, который определяет как восходящие, так и нисходящие масштабы длин, на которые влияет вершина и основание ППС, и использует меньшую из них для масштаба длины.

### Параметризация приземного слоя по модифицированной схеме MM5.

Схема MM5 основана на теории Монина-Обухова с вязким подслоем Карслона-Боланда и стандартными функциями подобия из справочных таблиц. В версии WRF 3.7 длины термической и влажной шероховатости (или коэффициенты обмена для тепла и влаги) над океаном изменены на формулу COARE 3 (Fairall et al., 2003) [35].

### Параметризация приземного слоя по схеме Eta.

Используется в модели Eta. Основана на теории Монина-Обухова с высотой термической шероховатости Зилитинкевича и стандартными функциями подобия из справочных таблиц.

Ниже представлены результаты верификации 4 комбинаций схем параметризации пограничного и приземного слоёв.

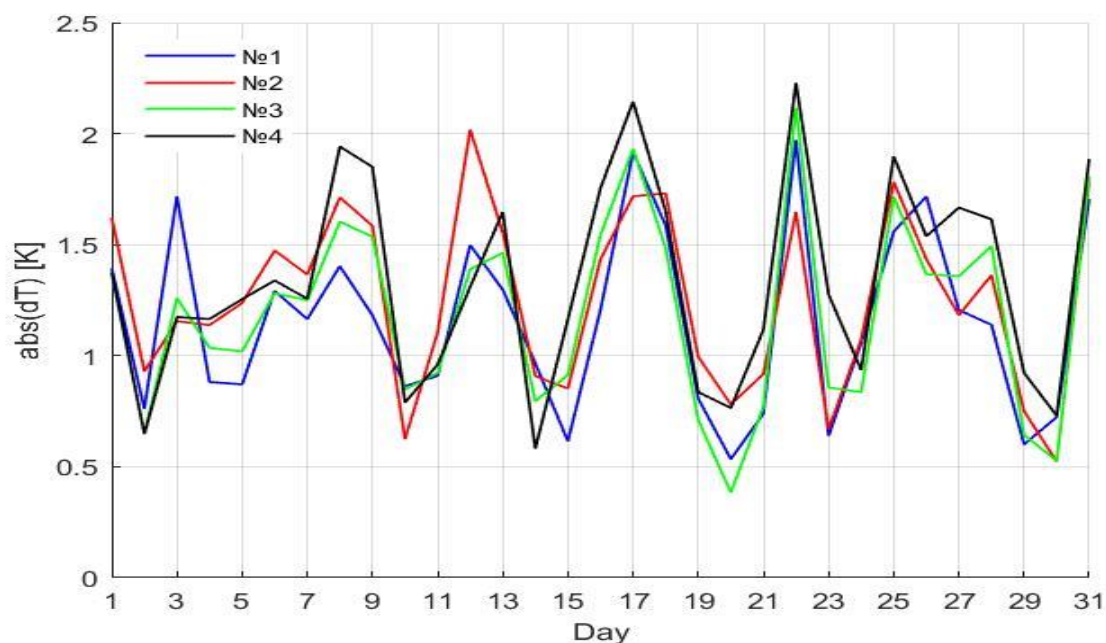


Рисунок 13. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании 4 комбинаций схем параметризации пограничного и приземного слоёв: №1(синий), №2 (красный), №3(зелёный), №4(чёрный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 13, можно сказать, что для комбинаций №1, №3 и №4 максимальная ошибка моделирования приходится на 22.07, а для комбинации №2 на 12.07.

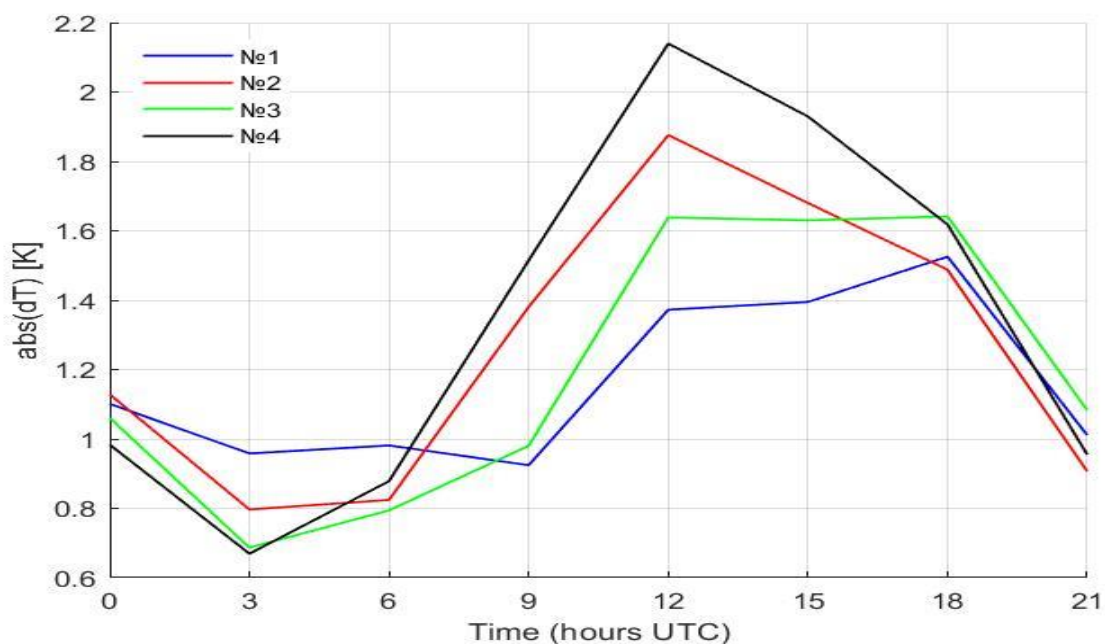


Рисунок 14. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании 4 комбинаций схем параметризации пограничного и приземного слоёв: №1(синий), №2 (красный), №3(зелёный), №4(чёрный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 14, можно сказать, что для комбинации №4 амплитуда дневного хода ошибок моделирования больше, чем для остальных. Для комбинации №1-наименьшая. Все 4 комбинации лучше показывают себя при моделировании в утренние часы по UTC. После 9:00 по UTC ошибка моделирования для всех 4 комбинаций начинает резко расти. Наибольшие за сутки ошибки моделирования наблюдаются для комбинации №4.

Ниже в таблице 9 представлены статистические критерии, рассчитанные для комбинаций параметризаций, рассматриваемых в этом разделе.

№ комбинации	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
№1	1.16	1.53	0.91	1.97	0
№2	1.26	1.64	0.91	2.02	1
№3	1.19	1.56	0.93	2.12	1
№4	1.34	1.75	0.93	2.23	2

Таблица 9. Рассчитанные статистические критерии для комбинаций параметризаций пограничного и приземного слоёв №1, №2, №3 и №4.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 9, видно, что средние за месяц абсолютная и среднеквадратическая ошибка моделирования меньше всего для комбинации №1. Максимальная ошибка моделирования и количество дней, когда прогноз был успешен также меньше для комбинации №1. Это свидетельствует о некотором преимуществе использования комбинации параметризаций №1. Но вместе с этой комбинацией нельзя использовать параметризацию микрофизики города. С остальными же комбинациями параметризаций можно использовать все три имеющиеся в WRF схемы параметризации микрофизики города. Поэтому необходимо выбрать ещё и лучшую комбинацию из оставшихся.

Комбинация параметризаций №3 имеет наименьшие среднюю абсолютную и среднеквадратическую ошибки моделирования, а также наименьшую амплитуду дневного хода абсолютных ошибок моделирования из оставшихся трёх, а коэффициент корреляции наибольший. Максимальная ошибка моделирования 22.07. для комбинации параметризаций №3 несколько больше, чем для №2, но использование схем параметризации микрофизики города позволит уменьшить эту ошибку. Таким образом, комбинацию параметризаций №3, наряду с №1, следует признать наиболее оптимальной.

Выводы из раздела: резюмируя всё вышеизложенное, комбинации параметризаций пограничного и приземного слоёв YSU-MM5(№1) и BouLac-MM5(№3) следует признать наиболее оптимальными для моделирования приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург. Первая из них будет использоваться при подборе оптимальной схемы параметризации почвенного слоя, а вторая при подборе оптимальной схемы параметризации микрофизики города в следующих разделах. Результаты верификации будут сравнены между собой и выбрана та комбинация из этих двух, которая имеет наименьшие ошибки.

### 3.6. Подбор оптимальной схемы параметризации почвенного слоя.

Известно, что между почвой и атмосферой происходит непрерывный теплообмен, поэтому подбор оптимальной схемы параметризации почвенного слоя играет важную роль в улучшении качества моделирования приземной температуры воздуха.

Почвенные модели используют информацию об атмосфере из схемы приземного слоя, информацию об радиационном воздействии из схем длинноволнового и коротковолнового излучения и информацию об воздействии осадков из микрофизических и конвективных схем вместе с внутренней информацией о переменных состояния земли и свойствах земной поверхности для обеспечения потоков тепла и влаги над участками земли и морского льда. Эти потоки обеспечивают нижние граничные условия для вертикального переноса, реализуемого в схемах ППС (или в схеме вертикальной диффузии в случае, если схема ППС не используется). Почвенные модели имеют различную степень сложности при работе с тепловыми потоками и потоками влаги в нескольких слоях почвы, а также могут учитывать влияние растительности, корней и навесов и прогнозировать поверхностный снежный покров. Почвенные модели не определяют никаких тенденций, но обновляют переменные состояния земли, которые включают температуру поверхности почвы, температурный профиль почвы, профиль влажности почвы и снежный покров. В почвенных моделях отсутствует горизонтальное взаимодействие между соседними точками, поэтому ее можно рассматривать как одномерную столбчатую модель для каждой точки сетки WRF.

В этом разделе будет подобрана оптимальная схема параметризации почвенного слоя. Как уже говорилось в разделе 3.5., подбор оптимальной схемы параметризации почвенного слоя будет осуществляться для комбинации параметризаций пограничного и приземного слоя №1 (YSU-MM5). Для этого были выбраны 3 схемы параметризации почвенного слоя: Noah, RUC и Noah-MP. Ниже дано описание всех трёх этих схем.

#### Noah Land Surface Model (Noah LSM).

Noah LSM является преемником схемы OSU LSM, описанной в работе (Chen and Dudhia, 2001) [36]. Эта схема была разработана совместно NCAR и NCEP и представляет собой единый код для исследовательских и эксплуатационных целей, почти идентичный коду, используемому в североамериканской мезомасштабной модели NCEP (NAM). Она имеет то преимущество, что согласуется с зависящими от времени почвенными полями, представленными в наборах данных анализа. В модели предсказывается температура и

влажность почвы на четырех уровнях: 10, 30, 60 и 100 см. Она включает в себя корневую зону, эвапотранспирацию, дренаж почвы и сток с учетом категорий растительности, ежемесячной доли растительности и текстуры почвы. Эта схема обеспечивает явные и скрытые тепловые потоки к схеме пограничного слоя. Модель Noah LSM дополнительно предсказывает влияние почвенного льда и дробного снежного покрова, связана со схемами параметризаций микрофизики города и учитывает свойства поверхностной излучательной способности. Есть суб-плитка (мозаика) для этой LSM (Li et al., 2013) [37], что позволяет дробить площади различных категорий землепользования в пределах ячейки сетки.

#### RUC Land Surface Model (RUC LSM).

RUC LSM-это многоуровневая модель почвы с более высоким разрешением в верхней части области почвы (0, 5, 20, 40, 160, 300 см - значение по умолчанию). В почвенной модели решаются уравнения диффузии тепла и влагопереноса Ричардса, а в холодное время года учитываются фазовые изменения почвенной воды (Smirnova et al., 1997) [38]. RUC LSM также имеет многослойную модель снега с изменяющейся плотностью снега, с повторно замерзающей жидкой водой, просачивающейся через снежный покров, с зависящим от глубины снега и температуры альбедо, с алгоритмами таяния, применяемыми как на границе снег-атмосфера, так и на границе снег-почва, а также с простой параметризацией фракционного снежного покрова. Модель также включает в себя растительные эффекты. RUC LSM имеет слойный подход к решению энергетических и влагосберегающих задач. Слой охватывает поверхность грунта и включает в себя половину первого атмосферного слоя и половину верхнего слоя грунта с соответствующими свойствами (плотность, теплоемкость и т.д.). Поступающие потоки (суммарная радиация, скрытые и явные тепловые потоки, тепловой поток почвы, вклад осадков в накопление тепла и т. д.) изменяют накопление тепла в этом слое.

#### Noah-MP (multi-physics) Land Surface Model.

Эта схема использует множество опций для описания взаимодействия почвы и атмосферы. Noah-MP содержит отдельный растительный навес, определяемый верхом и низом навеса, с физическими и радиометрическими свойствами листа, используемыми в двухпоточковой схеме передачи излучения навеса, которая включает эффекты затенения. Noah-MP содержит многослойный снежный покров с возможностью хранения жидкой воды

и способностью к таянию/замерзанию, а также модель перехвата снега, описывающую загрузку/разгрузку, таяние/повторное замерзание и сублимацию перехваченного навесом снега. Существует несколько вариантов проникновения и стока поверхностных вод, а также переноса и хранения подземных вод, включая глубину грунтовых вод в неограниченный водоносный горизонт. Горизонтальную и вертикальную плотность растительности можно задавать или прогнозировать с использованием прогностического фотосинтеза и динамических моделей растительности, которые распределяют углерод между растительностью (лист, стебель, древесина и корень) и почвенными залежами углерода (быстро и медленно).

Ниже представлены результаты верификации 3 рассмотренных выше схем параметризации почвенного слоя.

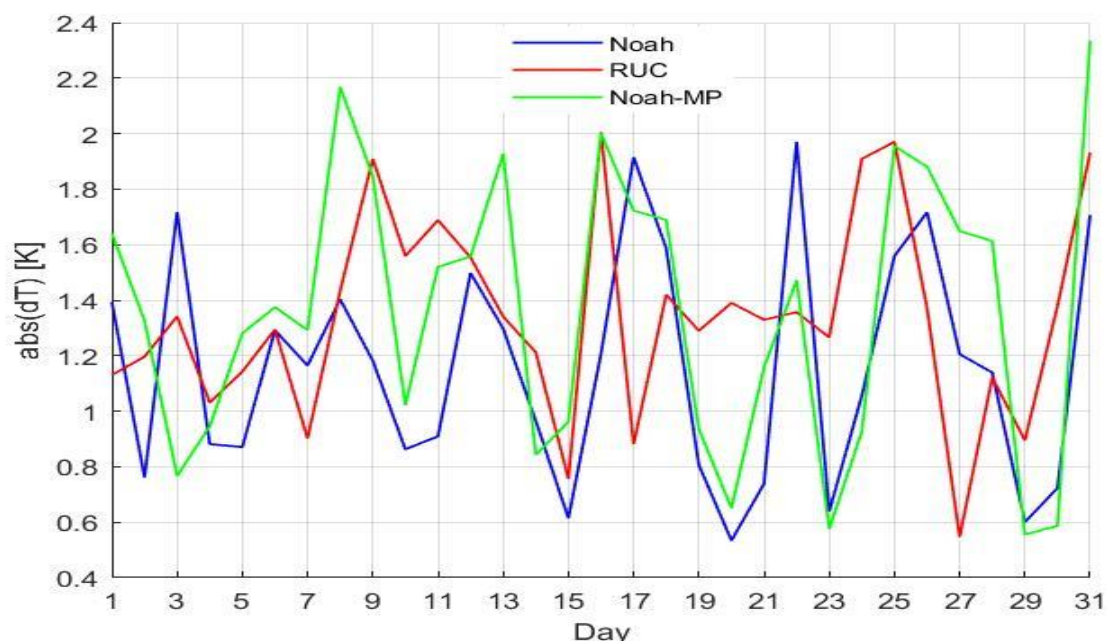


Рисунок 15. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации почвенного слоя: Noah (синий), RUC (красный) и Noah-MP (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 15, можно сказать, что при использовании схемы параметризации почвенного слоя Noah-MP прогноз был неуспешен 08.07., 16.07 и 31.07. При использовании схемы RUC прогноз можно признать неудовлетворительным только 16.07. При использовании схемы Noah прогноз был удовлетворительный на протяжении всего периода моделирования.

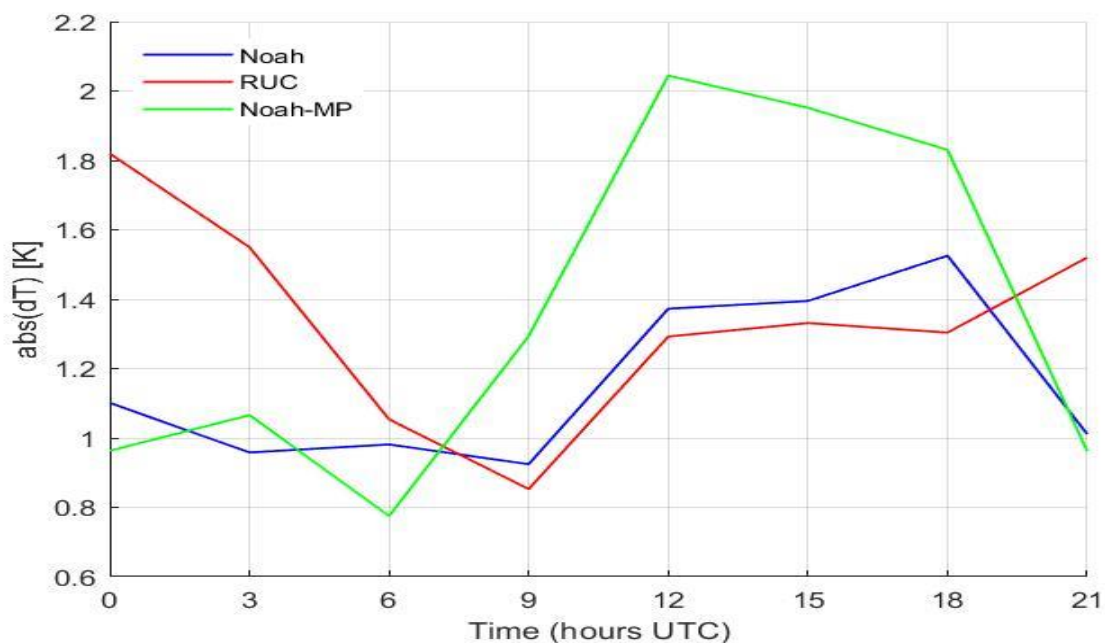


Рисунок 16. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации почвенного слоя: Noah (синий), RUC (красный) и Noah-MP (зелёный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 16, можно сделать вывод о том, что при использовании схемы параметризации почвенного слоя Noah амплитуда дневного хода ошибок моделирования наименьшая. Также для схемы Noah наблюдаются наименьшие ошибки моделирования за сутки среди всех. Для схемы параметризации Noah-MP амплитуда дневного хода и максимальные за сутки ошибки моделирования наибольшие. В ночные и утренние часы по UTC схема параметризации RUC справляется с прогнозом хуже остальных, а в дневные схема параметризации Noah-MP была наименее эффективной.

Ниже в таблице 10 представлены статистические критерии, рассчитанные для схем параметризации почвенного слоя, рассматриваемых в этом разделе.



Схема	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
Noah	1.16	1.53	0.91	1.97	0
RUC	1.35	1.65	0.91	2.01	1
Noah-MP	1.36	1.78	0.92	2.33	3

Таблица 10. Рассчитанные статистические критерии для параметризации почвенного слоя Noah, RUC и Noah-MP.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 10, можно сделать вывод о том, что прогноз приземной температуры воздуха при использовании схемы параметризации почвенного слоя Noah в целом был наиболее успешен, поскольку для этой схемы параметризации средняя за месяц абсолютная, среднеквадратическая и максимальная осреднённая за день ошибки моделирования наименьшие. Также, в отличие от двух других схем параметризации, моделирование при использовании схемы параметризации Noah было успешно на протяжении всего времени.

Выводы из раздела: Ввиду вышесказанного, схему параметризации почвенного слоя Noah можно признать наиболее оптимальной для моделирования приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург.

### 3.7. Подбор оптимальной схемы параметризации микрофизики города.

Известно, что климат больших городов, таких как Санкт-Петербург, отличается от фонового климата планеты. Разница температур может составлять 1-6 °C. Причина этого в том, что постройки и дороги нагреваются сильнее естественной местности, а также в наличии в черте города крупных промышленных предприятий и большого количества транспорта, что приводит к повышенному содержанию парниковых газов в атмосфере города. Именно для учёта микроклимата города в WRF-ARW есть параметризации микрофизики города.

В этом разделе будет выбрана оптимальная схема параметризации микрофизики города. Все три схемы параметризации микрофизики города могут использоваться только с комбинациями параметризаций пограничного и приземного слоя №2, №3 и №4 из раздела 3.5 и схемой параметризации почвенного слоя Noah LSM. Также в разделе 3.5. было доказано преимущество комбинации №3, которая включает в себя параметризацию пограничного слоя

по схеме BouLac в связке с параметризацией приземного слоя по модифицированной схеме MM5. Эта комбинация и будет использоваться в этом разделе при подборе оптимальной схемы параметризации микрофизики города. На данный момент в WRF-ARW имеются три схемы параметризации микрофизики города: UCM, BEP и BEM. Ниже приведено описание всех рассматриваемых в этом разделе схем параметризации микрофизики города.

#### Urban canopy model (UCM).

Для того чтобы представить влияние эффектов городского масштаба на мезомасштабном уровне, была разработана модель городского навеса (UCM) первоначально (Kusaka et al., 2001) [39] и (Kusaka and Kimura, 2004) [40], а затем модифицирована (Chen et al., 2006) [41], она связана с моделью WRF через почвенную модель Noah LSM. В UCM все городские эффекты по вертикали считаются подсеточными масштабами, что означает, что городские процессы происходят ниже самого низкого уровня модели. UCM включает в себя:

- Параметризацию уличных каньонов для представления городской геометрии
- Затенение от здания и отражение излучения
- Экспоненциальный профиль ветра в слое городского навеса
- Многослойное тепловое уравнение для крыши, стен и дорожных покрытий

UCM оценивает температуру поверхности и тепловые потоки от крыши, стены и дорожного покрытия. Она также вычисляет обмен импульсами между городской поверхностью и атмосферой. UCM может работать с тремя различными плотностями городского развития с использованием специальных категорий землепользования. Начиная с версии 3, в качестве опции был добавлен антропогенный суточный цикл обогрева.

#### Building Environment Parameterization (BEP).

Эта городская модель также направлена на учет большего количества динамических эффектов зданий на поток (Martilli et al., 2002) [42]. Здания могут непосредственно воздействовать на нижний модельный слой подходящих вариантов схем ППС (MYJ и BouLac). Эта схема также может быть адаптирована к более детальным наборам данных городской морфологии, таким как NUDAPT и WUDAPT.

## Building Energy Model (BEM).

Городская модель, которая основывается на ВЕР, но в неё включены ещё эффекты запаса энергии зданиями, включая передачу тепла через стены, окна, полы, крыши и т.д. В модель ВЕМ также включены эффекты кондиционирования воздуха в регулируемых средах и эффекты антропогенного внутреннего отопления в дополнение к внешним влияниям городских каньонов, которые учтены в других городских моделях (Salamanca and Martilli, 2010) [43]. Эта модель позволяет прогнозировать потребление энергии.

Ниже представлены результаты верификации 3 рассмотренных выше схем параметризации микрофизики города, а также результаты верификации модели, когда микрофизика города не использовалась.

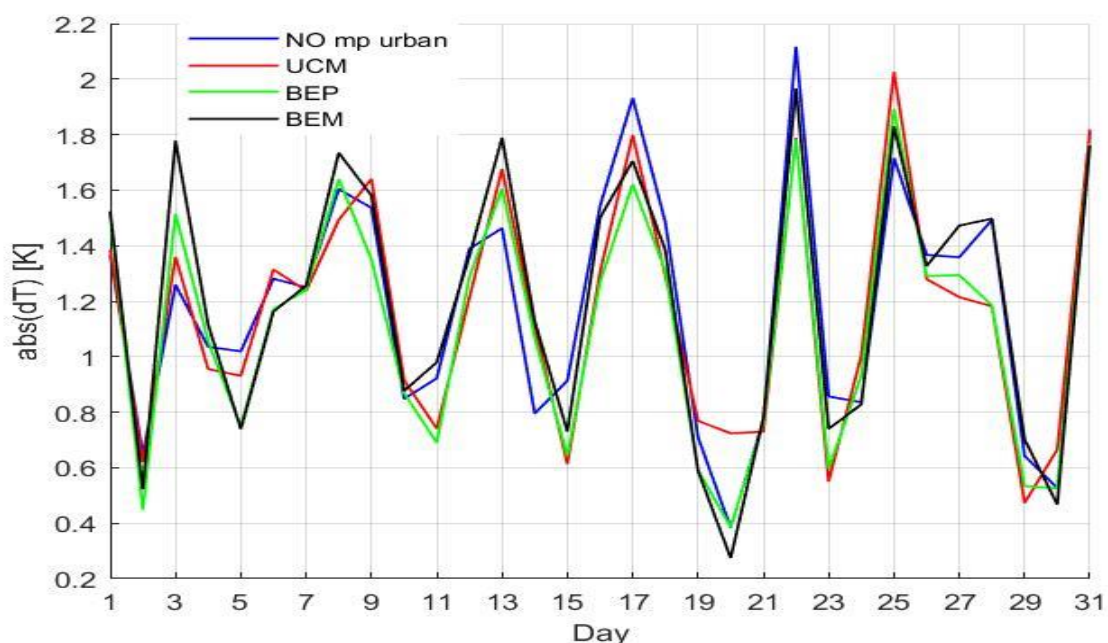


Рисунок 17. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации микрофизики города: UCM (красный), ВЕР (зелёный), ВЕМ (чёрный), а также без использования параметризации микрофизики города (синий).

Анализируя графики, представленные на рисунке 17, можно сделать вывод о том, что использование схем параметризации микрофизики города уменьшало ошибки моделирования 05.07., 15.07., 17.07., 22.07. и 23.07. Уменьшение ошибок моделирования в эти дни особо хорошо заметно для параметризации ВЕР. Но также были дни, когда

использование схем параметризаций микрофизики города негативно влияло на качество моделирования-это 03.07., 13.07., 14.07. и 25.07.

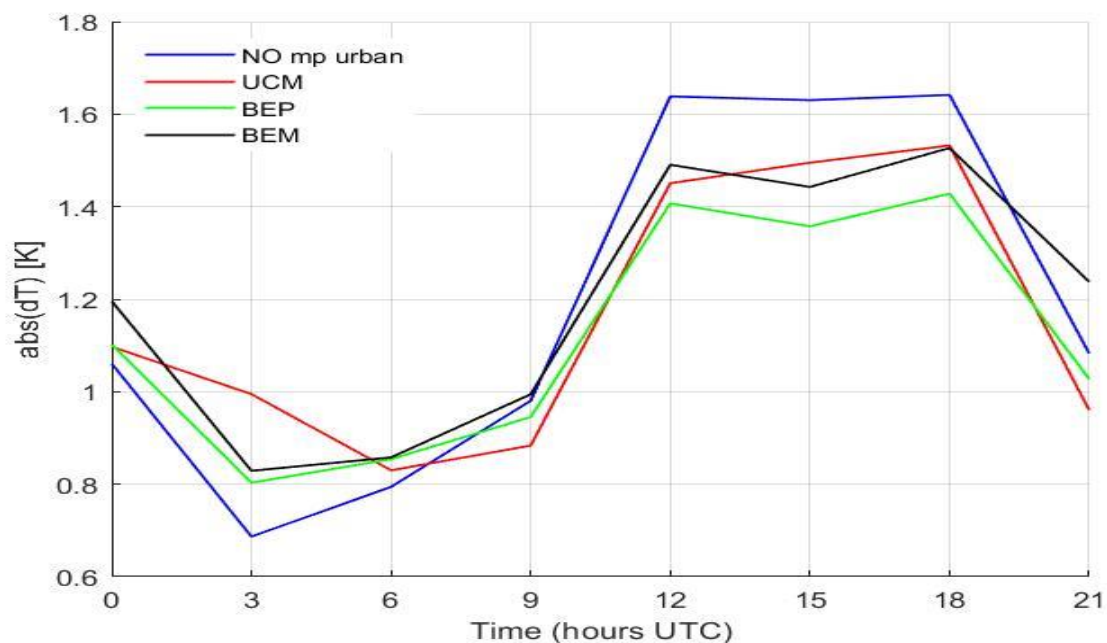


Рисунок 18. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании схем параметризации микрофизики города: UCM (красный), BEP (зелёный), BEM (чёрный), а также без использования параметризации микрофизики города (синий).

Анализируя графики, представленные на рисунке 18, можно сделать вывод о том, что использование схем параметризации микрофизики города уменьшает амплитуду суточного хода ошибок моделирования. В период с 0 по 6 часов по UTC использование параметризаций микрофизики ухудшает качество прогноза, а с 9 по 18 часов по UTC, наоборот, улучшает.

Ниже в таблице 11 представлены статистические критерии, рассчитанные для схем параметризации микрофизики города, рассматриваемых в этом разделе.

Схема	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	Кол-во дней, когда прогноз неуспешен
не использовалась	1.19	1.56	0.93	2.12	1
UCM	1.16	1.51	0.92	2.03	1
ВЕР	1.12	1.47	0.92	1.89	0
ВЕМ	1.20	1.56	0.92	1.97	0

Таблица 11. Статистические критерии, рассчитанные для результатов моделирования при использовании схем параметризации микрофизики города: UCM, ВЕР, ВЕМ, а также для результатов моделирования без использования схем параметризации микрофизики города.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 11, можно сделать вывод о том, что использование схем параметризации микрофизики города UCM и ВЕР уменьшает среднюю абсолютную и среднеквадратическую ошибки моделирования, а также максимальную за месяц ошибку моделирования относительно случая, когда параметризации микрофизики города не использовались. Из трёх схем параметризации микрофизики города средняя абсолютная и среднеквадратическая ошибки моделирования, а также максимальная за месяц ошибка моделирования меньше всего для параметризации ВЕР. Прогноз при использовании параметризации ВЕР был успешен на протяжении всего периода моделирования, поскольку осреднённые за день абсолютные ошибки моделирования не превышали 2 градуса.

Выводы из раздела: Ввиду вышеизложенного, схему параметризации микрофизики города ВЕР следует признать наиболее оптимальной для прогноза приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург.

### 3.8. Выводы из главы.

Прежде чем подводить итоги нужно выбрать одну из двух комбинаций параметризаций, признанных наиболее оптимальными в разделах 3.6. и 3.7. Эти комбинации представлены ниже в таблице 12.

№ комбинации	Пограничный слой	Приземный слой	Почвенный слой	Микрофизика города
1	YSU	MM5	Noah	Нет
2	BouLac	MM5	Noah	ВЕР

Таблица 12. Комбинации, признанные наиболее оптимальными в разделах 3.6. и 3.7.

Как уже упоминалось, схема параметризации пограничного слоя YSU показала себе несколько лучше, чем схема BouLac, но схема YSU не может использоваться со схемами параметризации микрофизики города, а BouLac может использоваться со всеми ними. Таким образом, было принято решение использовать схему параметризации пограничного слоя YSU при подборе оптимальной схемы параметризации почвенного слоя, а параметризацию BouLac при подборе оптимальной схемы параметризации микрофизики города.

Ниже представлены результаты верификации комбинаций из таблицы 12.

№ комбинации	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	$r$	max [K]	кол-во дней, когда прогноз неуспешен
1	1.16	1.53	0.91	1.97	0
2	1.12	1.47	0.92	1.89	0

Таблица 13. Статистические критерии, рассчитанные для результатов моделирования при использовании комбинаций параметризаций №1 и №2.

Анализируя данные, представленные в таблице 13, видно, что по всем статистическим критериям комбинация параметризаций №2 является наиболее оптимальной для прогноза приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург. Эта комбинация включает в себя параметризацию пограничного слоя по схеме BouLac в связке с параметризацией микрофизики города по схеме ВЕР.

Подводя итоги работы по подбору оптимальной комбинации параметризаций процессов подсеточного масштаба, проведённой в данной главе, следует отметить, что

следующие схемы параметризаций являются наиболее оптимальными для прогноза приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург.

Класс параметризации	Лучшая схема параметризации
Параметризация микрофизических процессов	Томпсона
Параметризация конвекции	Беттса-Миллера-Янича
Параметризация длинноволновой радиации	RRTMG
Параметризация коротковолновой радиации	Новая схема центра космических полётов им. Годдарда
Параметризация пограничного слоя	Bougeault-Lacarrère
Параметризация приземного слоя	MM5
Параметризация почвенного слоя	Noah
Параметризация микрофизики города	BER

Таблица 14. Оптимальная комбинация параметризаций.

Ниже представлены результаты верификации моделирования при использовании тестовой и оптимальной комбинаций параметризаций.

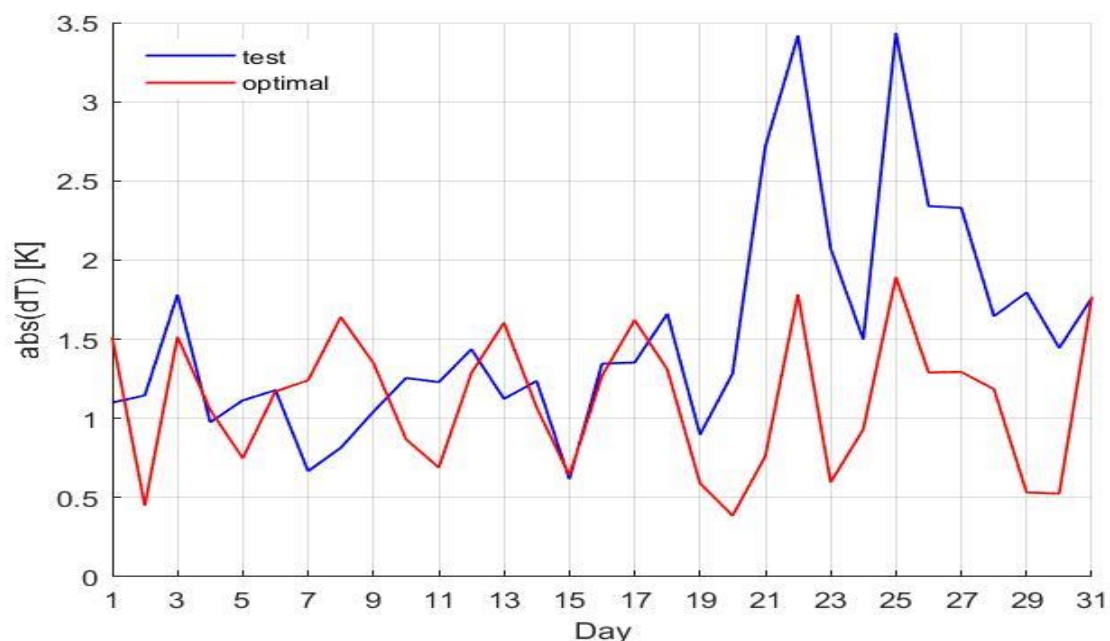


Рисунок 19. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании тестовой (синий) и оптимальной (красный) комбинаций схем параметризаций.

На графиках, представленных на рисунке 19, хорошо заметно уменьшение максимальных ошибок моделирования 22.07. и 25.07. при использовании оптимальной комбинации параметризаций относительно тестовой.

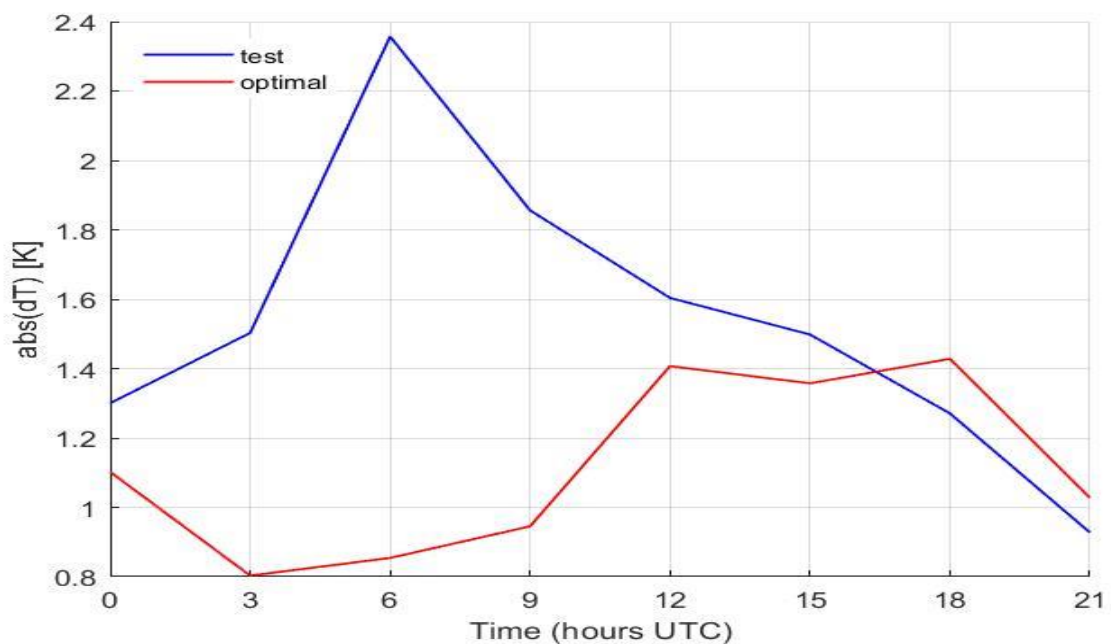


Рисунок 20. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании тестовой (синий) и оптимальной (красный) комбинаций схем параметризаций.

При анализе графиков, представленных на рисунке 20, хорошо заметно уменьшение амплитуды суточного хода ошибок моделирования при использовании оптимальной комбинации параметризаций относительно тестовой. Также можно отметить существенное уменьшение ошибок моделирования в первой половине дня по UTC при использовании оптимальной комбинации параметризаций относительно тестовой.

Ниже в таблице 15 представлены статистические критерии, рассчитанные для тестовой и оптимальной комбинации параметризаций.



Комбинация	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	кол-во дней, когда прогноз неуспешен
Тестовая	1.55	2.06	0.85	3.43	6
Оптимальная	1.12	1.47	0.92	1.89	0

Таблица 15. Статистические критерии, рассчитанные для результатов моделирования при использовании тестовой и оптимальной комбинаций параметризаций.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 15, можно сделать вывод о том, что при переходе от тестовой комбинации параметризаций к оптимальной абсолютная ошибка моделирования уменьшилась на 0.43 градуса, среднеквадратическая ошибка на 0.59 градуса, коэффициент корреляции между модельными данными и данными наблюдений на метеостанции увеличился на 0.07, максимальная за месяц ошибка моделирования уменьшилась на 1.54 градуса. Также при использовании оптимальной комбинации параметризаций прогноз приземной температуры воздуха успешен в течение всего периода моделирования, в отличие от тестовой комбинации параметризаций, для которой было 6 дней, когда прогноз можно признать неудовлетворительным. В приложении А представлено поле температуры и давления для всей расчётной области при моделировании с использованием тестовой комбинации параметризаций, а в приложении Б при использовании оптимальной.

С целью дальнейшего улучшения качества моделирования в следующей главе будут использоваться вложенные сетки, а также будет подобрана оптимальная конфигурация этих сеток. Для выявления лучшей конфигурации сеток будет использован набор параметризаций, признанный оптимальным в этой главе.

#### Глава 4. Подбор оптимальной конфигурации вычислительных сеток.

Как уже упоминалось в главе №1, в гидродинамическом моделировании для улучшения качества прогноза могут использоваться вложенные сетки. В данной главе были определены следующие конфигурации вычислительных сеток.

№	Соотношение размеров вложенной и материнской сетки	Сетка	Характеристики		
			Пространственное разрешение, км	Разрешение геоданных	Кол-во узлов
Конфигурация №1	1:2	материнская	9	2'	60x60
		вложенная	4,5	30''	61x61
Конфигурация №2	1:3	материнская	9	2'	60x60
		вложенная	3	30''	58x58

Таблица 16. Конфигурации вычислительных сеток.

На рисунке 21 представлены, описанные в таблице 16, конфигурации вычислительных сеток.

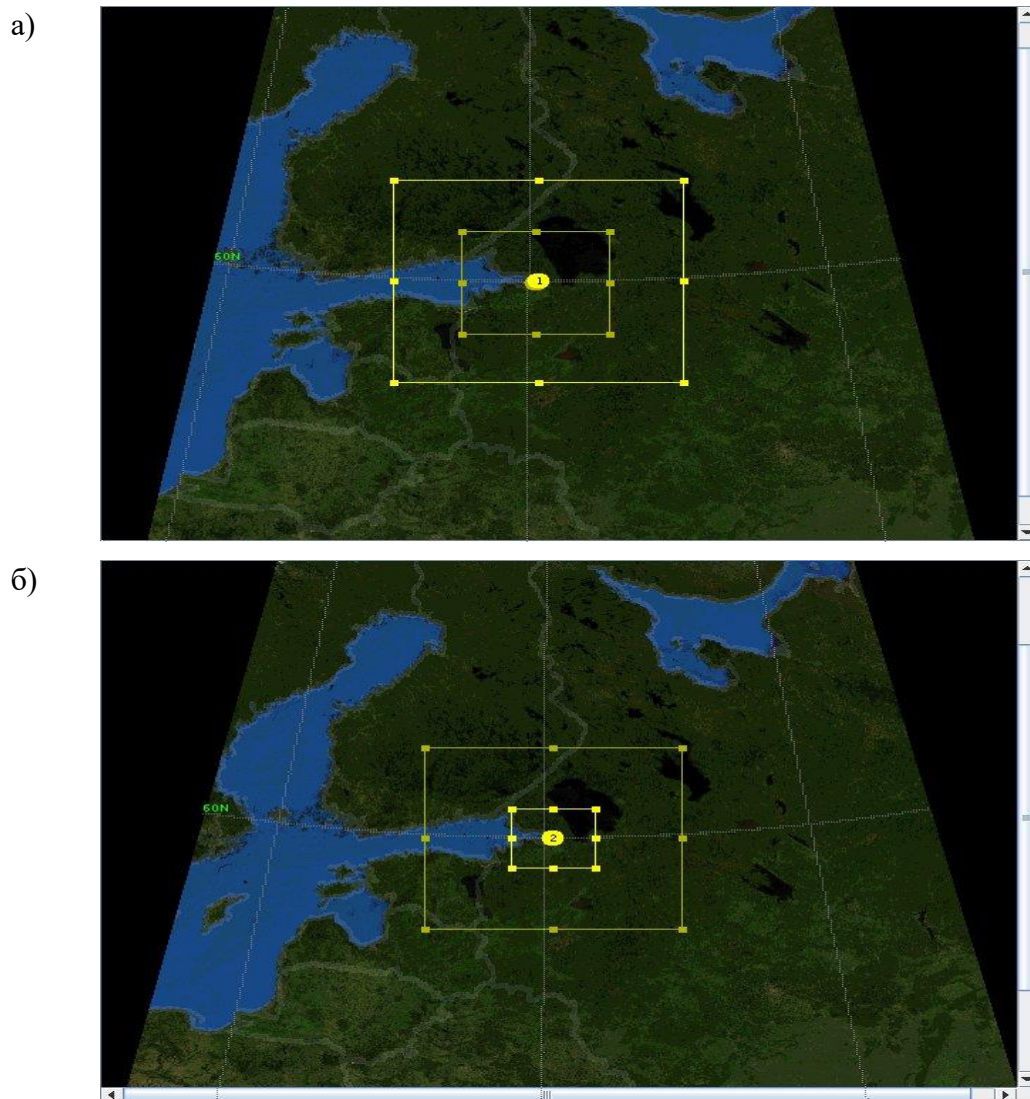


Рисунок 21. Конфигурации вычислительных сеток: а) №1, б) №2.

При использовании вложенных сеток в этой главе было включено двухстороннее взаимодействие материнской и вложенной сетки.

Для верификации результатов моделирования была выбрана точка на вложенной сетке с координатами  $60^\circ$  с.ш.,  $30,3^\circ$  в.д., координаты этой точки соответствуют местоположению метеорологической станции в г. Санкт-Петербург.

Ниже приведены результаты верификации моделирования при использовании представленных в таблице 16 конфигураций вычислительных сеток, а также для сравнения взяты результаты верификации моделирования из прошлой главы без использования вложенных сеток.

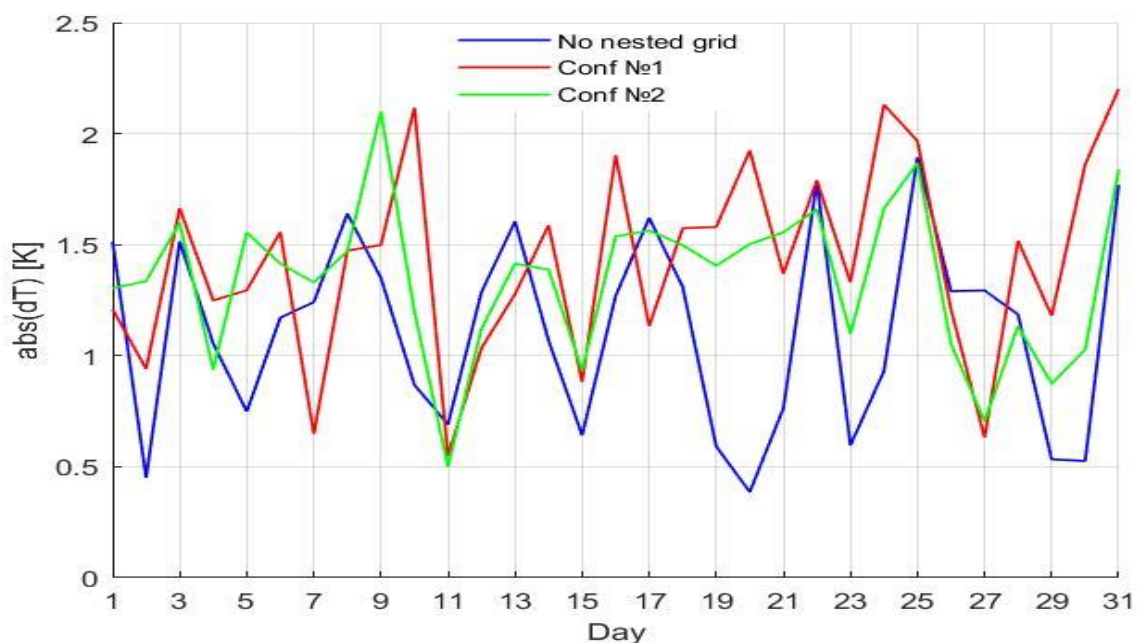


Рисунок 22. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании конфигурации сеток №1 (красный) и №2 (зелёный), а также без использования вложенных сеток (синий).

Анализируя графики, представленные на рисунке 22, можно сделать вывод о том, что при использовании конфигурации сеток №1 прогноз можно признать неуспешным 10.07., 24.07. и 31.07., а при использовании конфигурации № 2 прогнозы был неудовлетворительным 09.07. Без использования же вложенных сеток прогноз был успешным на протяжении всего периода моделирования.

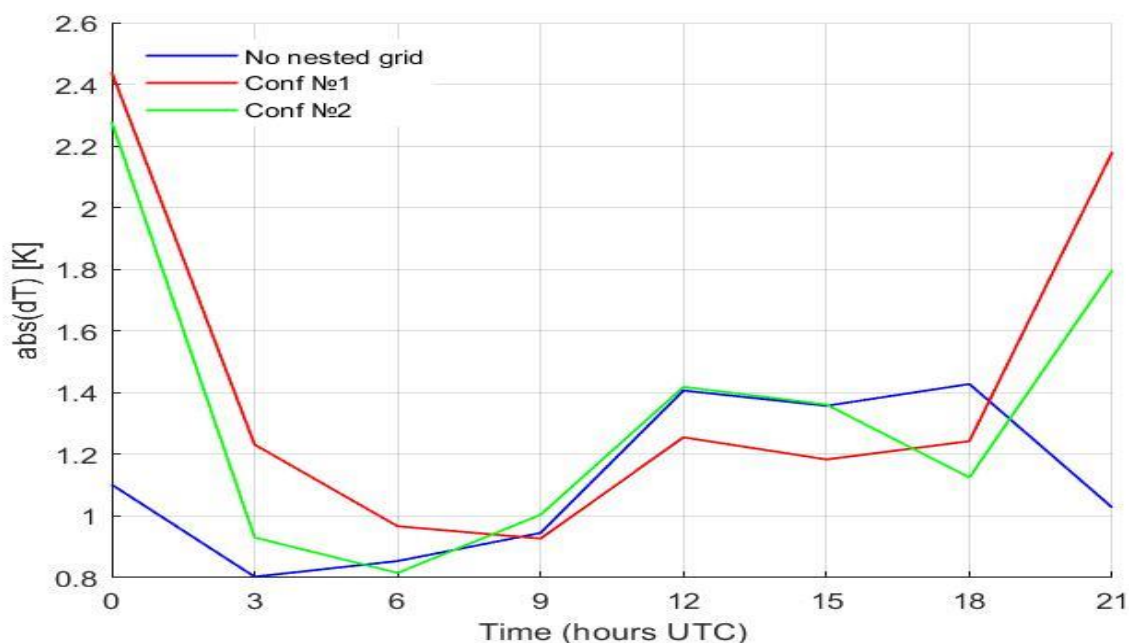


Рисунок 23. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании конфигурации сеток №1 (красный) и №2 (зелёный), а также без использования вложенных сеток (синий).

Анализируя графики, представленные на рисунке 23, можно сделать вывод о том, что при использовании вложенных сеток амплитуда суточного хода ошибок моделирования больше, чем без использования вложенных сеток. Также при использовании вложенных сеток отмечается существенное ухудшение качества прогноза в ночные часы по UTC относительно случая, когда вложенные сетки не использовались.

Ниже в таблице 17 представлены статистические критерии, рассчитанные для конфигураций вычислительных сеток, рассматриваемых в этом разделе.

Конфигурация	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	кол-во дней, когда прогноз неуспешен
Без вложенных сеток.	1.12	1.47	0.92	1.89	0
№ 1	1.44	1.84	0.90	2.20	3
№ 2	1.35	1.75	0.90	2.10	1

Таблица 17. Статистические критерии, рассчитанные для моделирования при использовании конфигураций вычислительных сеток №1 и №2, а также для случая, когда вложенные сетки не использовались.

Анализируя статистические данные, представленные в таблице 17, можно сделать вывод о том, что применение вложенных вычислительных сеток негативно сказывается на качестве прогноза, поскольку ошибки моделирования при использовании конфигураций сеток №1 и №2 больше, чем для случая, когда вложенные сетки не использовались. Также следует отметить, что использование вложенных вычислительных сеток ведёт к существенному увеличению времени моделирования.

Выводы из главы: на основании всего вышеизложенного применение вложенных вычислительных сеток представляется не эффективным. Далее в главе 5 будет использоваться конфигурация без вложенных сеток.

## Глава 5. Оценка чувствительности модели к изменению эмпирических коэффициентов в параметризации ППС по схеме BouLac.

В схеме параметризации ППС BouLac кинетическая энергия турбулентности считается по формуле:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{w'e'} - \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta \overline{w'\theta'} - \varepsilon \quad (5.1)$$

где  $e$ —кинетическая энергия турбулентности,  $\rho$ —плотность воздуха,  $U$ ,  $V$  и  $W$ —компоненты скорости ветра,  $\beta$ —коэффициент плавучести ( $\beta=g/T$ ),  $\theta$ —потенциальная температура,  $\varepsilon$ —диссипация КЭТ за счёт молекулярных процессов. Штрихом обозначены пульсации, а чертой осреднение.

Моменты второго порядка в уравнении (5.1) параметризуются при помощи коэффициентов турбулентного обмена в формулах (5.2)–(5.5).

$$\overline{w'u'} = -K_m \frac{\partial U}{\partial z} \quad (5.2)$$

$$\overline{w'v'} = -K_m \frac{\partial V}{\partial z} \quad (5.3)$$

$$\overline{w'e'} = -K_e \frac{\partial e}{\partial z} \quad (5.4)$$

$$\overline{w'\theta'} = \left\{ \begin{array}{l} -K_h \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_{cg} \right) - \text{в случае конвекции} \\ -K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} - \text{в остальных случаях} \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

где  $K_m$ ,  $K_e$ ,  $K_h$ —коэффициенты турбулентного обмена импульсом, КЭТ и теплом, соответственно,  $\gamma_{cg}$ —равновесный градиент температуры (Deardorff, 1972) [44].

Коэффициенты турбулентного обмена вычисляются через КЭТ по формулам (5.6)–(5.8)

$$K_m = C_k l_k \sqrt{e} \quad (5.6)$$

$$K_e = \alpha_e K_m \quad (5.7)$$

$$K_h = \alpha_T K_m \quad (5.8)$$

где  $C_k$ —эмпирический коэффициент,  $l_k$ —путь смешения,  $\alpha_T, \alpha_e$ —обратные числа Прандтля ( $\alpha_T = \alpha_e = 1$ ).

И, наконец, диссипация КЭТ рассчитывается по формуле (5.9)

$$\varepsilon = C_\varepsilon e^{\frac{3}{2}} / l_\varepsilon \quad (5.9)$$

где  $C_\varepsilon$ —эмпирический коэффициент,  $l_\varepsilon$ —путь смешения.

Стандартные значения эмпирических коэффициентов  $C_k$  и  $C_\varepsilon$  прописаны в коде параметризации ППС по схеме BouLac.  $C_\varepsilon \approx 0.7$ ,  $C_k = 0.4$ . Более подробную информацию об уравнениях и коэффициентах, которые включает в себя схема BouLac, можно найти в работе (Bougeault and Lacarrere, 1989) [34].

В данной главе ВКР были проведены эксперименты по подбору эмпирических коэффициентов  $C_k$  и  $C_\varepsilon$ . Для этого были внесены изменения в исходный код параметризации ППС по схеме BouLac. Подробно параметризация ППС по схеме BouLac была описана в 3-й главе ВКР.

### 5.1. Подбор эмпирического коэффициента $C_\varepsilon$ для расчёта диссипации КЭТ.

В этом разделе описаны численные эксперименты по подбору эмпирического коэффициента  $C_\varepsilon$ , который используется при расчёте диссипации КЭТ.

Как уже упоминалось выше стандартное значение  $C_\varepsilon \approx 0.7$ . В этом разделе были проведены эксперименты со следующими значениями  $C_\varepsilon$ :  $C_\varepsilon = 0.4, C_\varepsilon = 0.5, C_\varepsilon = 0.6, C_\varepsilon = 0.8, C_\varepsilon = 0.9, C_\varepsilon = 1.0$ . При этом значение коэффициента  $C_k$  в этом разделе не менялось ( $C_k = 0.4$ ).

Ниже в таблице 18 приведены результаты верификации моделирования при различных значениях коэффициента  $C_\varepsilon$ .



Значение коэффициента $C_\varepsilon$ .	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	кол-во дней, когда прогноз неуспешен
0.7	1.12	1.47	0.92	1.89	0
0.8	1.11	1.46	0.92	1.90	0
0.9	1.11	1.47	0.92	1.98	0
1.0	1.13	1.49	0.92	2.04	2
0.6	1.12	1.45	0.92	1.82	0
0.5	1.13	1.48	0.92	1.79	0
0.4	1.17	1.53	0.92	2.05	1

Таблица 18. Статистические критерии, рассчитанные для моделирования при различных значениях коэффициента  $C_\varepsilon$  для температуры.

Анализируя статистические данные, приведённые в таблице 18, можно сделать вывод, что при крайних значениях коэффициента  $C_\varepsilon$  (0.4 и 1.0) прогноз становится несколько хуже, поскольку возрастает максимальная осреднённая за сутки абсолютная ошибка моделирования и количество дней, когда прогноз был неуспешен. На основании статистических критериев, представленных в таблице 18 сложно выделить преимущества использования конкретного значения коэффициента  $C_\varepsilon$  из оставшихся.

Ниже на рисунке 24 представлены графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных ошибок моделирования для следующих значений коэффициента  $C_\varepsilon$ :  $C_\varepsilon=0.7$ ,  $C_\varepsilon=0.8$ ,  $C_\varepsilon=0.9$ ,  $C_\varepsilon=0.6$  и  $C_\varepsilon=0.5$ .

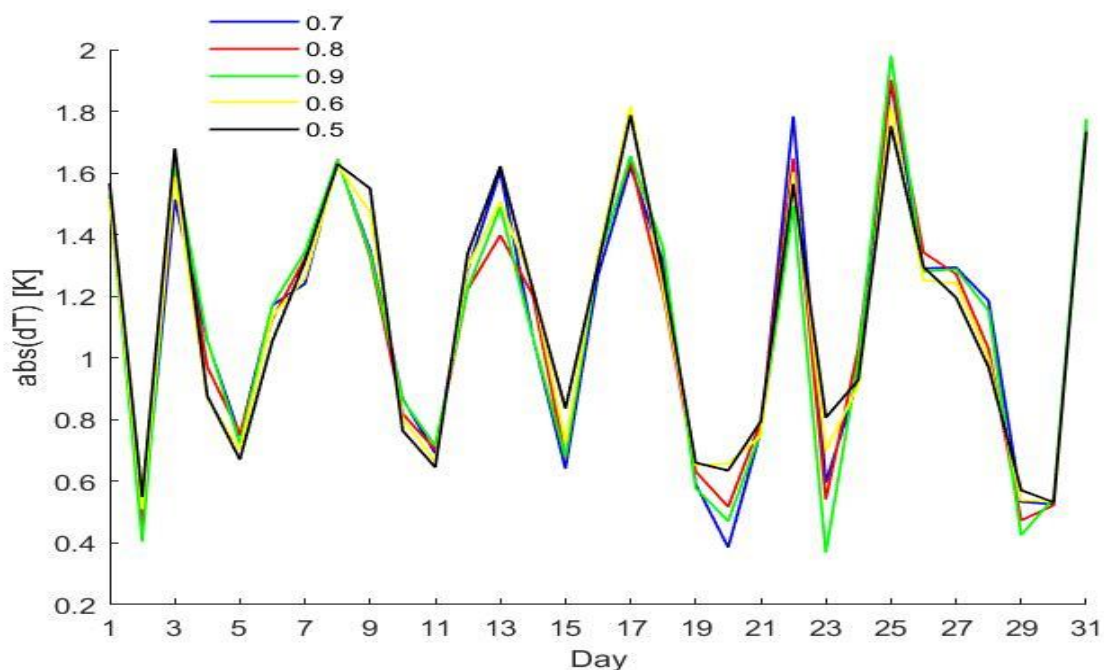


Рисунок 24. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании значений коэффициента  $C_\varepsilon=0.7$  (синий),  $C_\varepsilon=0.8$  (красный),  $C_\varepsilon=0.9$  (зелёный),  $C_\varepsilon=0.6$  (жёлтый) и  $C_\varepsilon=0.5$  (чёрный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 24, можно сделать вывод о том, что в применение одного из рассматриваемых значений коэффициента  $C_\varepsilon$  в разные дни может оказывать как положительный эффект на качество моделирования, так и отрицательный. Так, например, для  $C_\varepsilon=0.9$  прогноз за 23.07 был несколько лучше, чем при использовании других коэффициентов  $C_\varepsilon$ . Но за 25.07 наблюдается обратная ситуация, при которой для  $C_\varepsilon=0.9$  прогноз хуже, чем при использовании других коэффициентов  $C_\varepsilon$ .

Далее на рисунке 25 представлены графики суточного хода осреднённых за месяц абсолютных ошибок моделирования для следующих значений коэффициента  $C_\varepsilon$ :  $C_\varepsilon=0.7$ ,  $C_\varepsilon=0.8$ ,  $C_\varepsilon=0.9$ ,  $C_\varepsilon=0.6$  и  $C_\varepsilon=0.5$ .

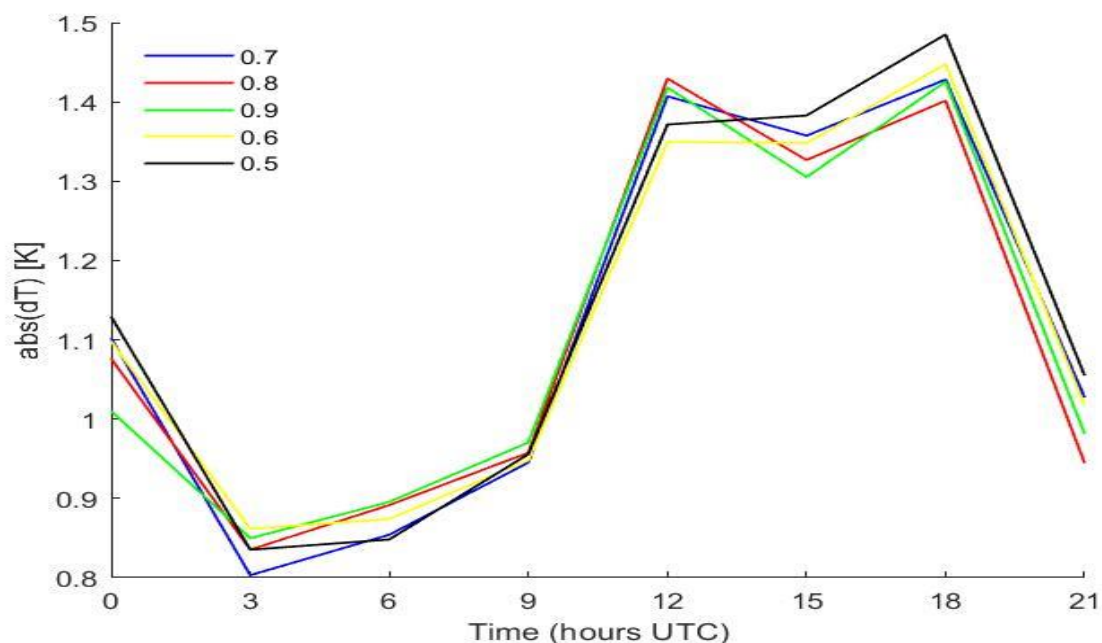


Рисунок 25. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании значений коэффициента  $C_\epsilon=0.7$  (синий),  $C_\epsilon=0.8$  (красный),  $C_\epsilon=0.9$  (зелёный),  $C_\epsilon=0.6$  (жёлтый) и  $C_\epsilon=0.5$  (чёрный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 25, можно сделать вывод о том, что моделирование приземной температуры воздуха в 00 и 15 часов по UTC было более успешным при использовании коэффициента  $C_\epsilon=0.9$ , в 03 по UTC при использовании коэффициента  $C_\epsilon=0.7$ , в 12 часов по UTC при использовании коэффициента  $C_\epsilon=0.6$ , а в 18 и 21 час по UTC прогноз при использовании коэффициента  $C_\epsilon=0.8$  был наиболее эффективным.

Выводы из раздела: по результатам верификации моделирования невозможно выделить преимущество использования какого то одного коэффициента  $C_\epsilon$ . Требуется дальнейшее изучение влияния коэффициента  $C_\epsilon$  на качество прогноза. И выделение условий погоды и циркуляционных особенностей атмосферы, при которых тот или иной коэффициент обеспечивает лучшее качество моделирования относительно других.

## 5.2. Подбор эмпирического коэффициента $C_k$ для расчёта коэффициента турбулентного обмена импульсом.

В этом разделе описаны численные эксперименты по подбору эмпирического коэффициента  $C_k$ , который используется при расчёте коэффициента турбулентного обмена импульсом.

Как уже упоминалось выше стандартное значение  $C_k = 0.4$ . В этом разделе были проведены эксперименты со следующими значениями  $C_k$ :  $C_k = 0.5, C_k = 0.6, C_k = 0.8, C_k = 0.3, C_k = 0.2$ . При этом значение коэффициента  $C_\varepsilon$  в этом разделе не менялось ( $C_\varepsilon \approx 0.7$ ).

Ниже в таблице 18 приведены результаты верификации моделирования при различных значениях коэффициента  $C_k$ .

Значение коэффициента $C_k$ .	$\delta$ [K]	$\sigma$ [K]	r	max [K]	кол-во дней, когда прогноз неуспешен
0.4	1.12	1.47	0.92	1.89	0
0.5	1.12	1.46	0.92	1.74	0
0.6	1.16	1.51	0.92	1.90	0
0.8	1.18	1.54	0.92	1.97	0
0.3	1.18	1.54	0.92	2.20	1
0.2	1.37	1.80	0.91	2.19	3

Таблица 19. Статистические критерии, рассчитанные для моделирования при различных значениях коэффициента  $C_k$  для температуры.

Анализируя статистические критерии, представленные в таблице 19, можно выделить моделирование при  $C_k=0.4$  и  $C_k=0.5$  как наиболее успешное, поскольку средняя абсолютная и среднеквадратическая ошибка при моделировании с этими значениями коэффициента  $C_k$  наименьшая. Из этих двух значений моделирование со значением коэффициента  $C_k=0.5$  имеет наименьшую максимальную осреднённую за сутки ошибку моделирования.

Ниже на рисунке 26 представлены графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных ошибок моделирования для значений коэффициента  $C_k = 0.4$  и  $C_k = 0.5$ .

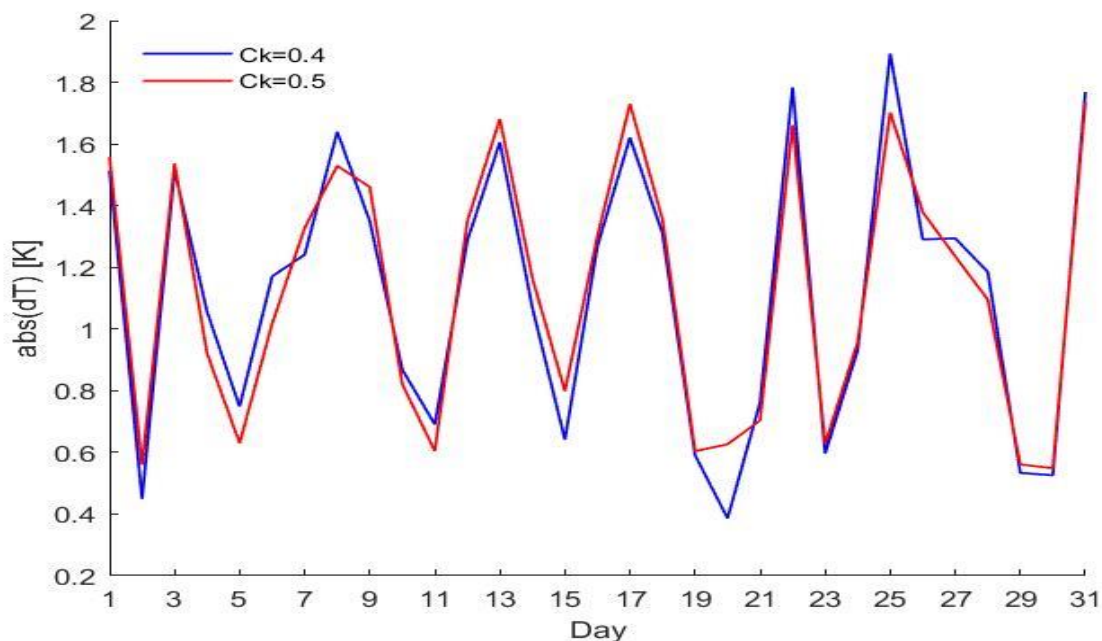


Рисунок 26. Графики месячного хода осреднённых за сутки абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании значений коэффициента  $C_k=0.4$  (синий),  $C_k=0.5$  (красный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 26, можно сделать вывод о том, что были дни, когда качество моделирования при использовании изменённого значения коэффициента  $C_k=0.5$  было лучше, чем при использовании стандартного значения  $C_k=0.4$ , например, 25.07., но было и наоборот, например, 17.07.

Далее на рисунке 27 представлены графики суточного хода осреднённых за месяц абсолютных ошибок моделирования для значений коэффициента  $C_k=0.4$ ,  $C_k=0.5$ .

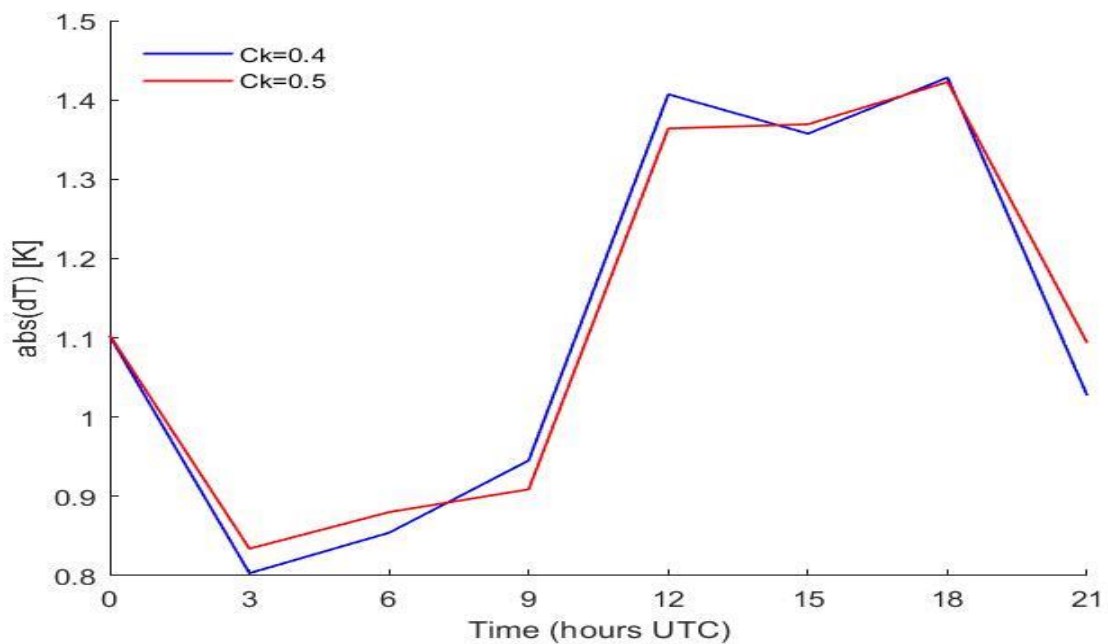


Рисунок 27. Суточный ход осреднённых за месяц абсолютных отклонений модельных данных от данных наблюдений на метеостанции для температуры при использовании значений коэффициента  $C_k=0.4$  (синий) и  $C_k=0.5$  (красный).

Анализируя графики, представленные на рисунке 27, можно сделать вывод о том, что моделирование при использовании стандартного значения коэффициента  $C_k=0.4$  было несколько успешней в 03, 06, 15 и 21 час по UTC. При использовании изменённого значения коэффициента  $C_k=0.5$  моделирование было несколько успешней в 09 и 12 часов по UTC.

Выводы из раздела: моделирование приземной температуры воздуха при использовании изменённого значения эмпирического коэффициента  $C_k=0.5$  следует признать наиболее успешным, поскольку при использовании этого значения несколько уменьшается максимальная осреднённая за день ошибка моделирования.

### 5.3. Выводы из главы.

В данной главе были произведены численные эксперименты по подбору эмпирических коэффициентов  $C_\epsilon$  и  $C_k$  с целью улучшения качества моделирования приземной температуры. По итогам работы, проведённой в этой главе можно сделать следующие выводы:

1. Модель WRF более чувствительна к изменению коэффициента  $C_k$ , чем  $C_\epsilon$ .

2. Не удалось выявить преимущество использования конкретного значения коэффициента  $C_\varepsilon$ . Необходимо проведение дополнительных исследований зависимости качества моделирования при использовании различных значений коэффициента  $C_\varepsilon$  от условий погоды и особенностей циркуляции атмосферы.

3. Изменение коэффициента  $C_k$  с 0.4 на 0.5 приводит к уменьшению максимальной за месяц ошибки моделирования с 1.89 до 1.74 К.

## Заключение.

В заключении сформулируем основные результаты и выводы по работе.

1. Во второй главе была подобрана вычислительная сетка, а также для того чтобы обеспечить устойчивость численного решения исходя из числа Куранта был подобран шаг по времени. Шаг по времени был равен 50 секундам.
2. Во второй главе был произведён тестовый запуск модели и произведена верификация результатов тестового моделирования.
3. В третьей главе по результатам верификации моделирования была подобрана оптимальная комбинация процессов подсеточного масштаба и тем самым улучшено качество моделирования приземной температуры воздуха в г. Санкт-Петербург.
4. В четвёртой главе было доказана неэффективность использования вложенных сеток в данной работе.
5. В пятой главе был подобран эмпирический коэффициент  $C_k$ , который используется для расчёта коэффициента турбулентного обмена импульсом и тем самым ещё немного улучшено качество моделирования приземной температуры в г. Санкт-Петербург.

Резюмируя всё вышеизложенное, в данной работе произведены оценки качества моделирования приземной температуры в г. Санкт-Петербург при различных конфигурациях модели и подобрана оптимальная конфигурация модели. Таким образом, модель оптимизирована для г. Санкт-Петербург и подготовлена для метеорологических исследований в данном регионе.



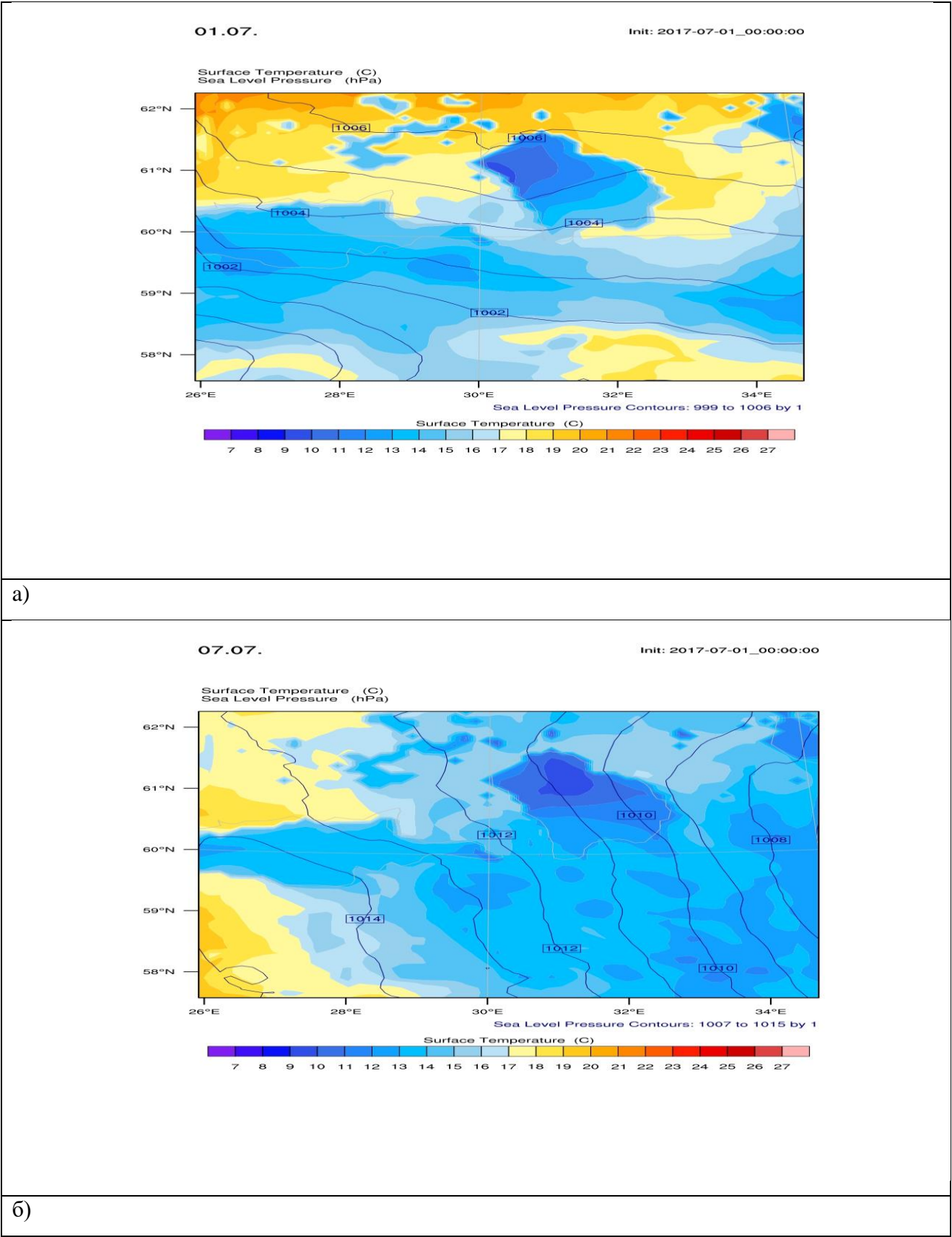
### Список использованных источников.

1. WRF-ARW V4: User's Guide
2. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
3. <http://meteo.ru/>
4. Wicker, L. J., and W. C. Skamarock, 2002: Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2088–2097
5. Наставление по службе прогнозов, 2017
6. Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092.
7. Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, 1984: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 20, 2949–2972.
8. Tao, W.-K., J. Simpson, and M. McCumber 1989: An ice-water saturation adjustment, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231–235.
9. Chen, S.-H., and W.-Y. Sun, 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 99–118.
10. Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
11. Dudhia, J., S.-Y. Hong, and K.-S. Lim, 2008: A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations. *J. Met. Soc. Japan*, 86, 33–44.
12. Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
13. Hong, S.-Y., H.-M. H. Juang, and Q. Zhao, 1998: Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2621–2639.
14. Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.
15. Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
16. Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 246 pp.

17. Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
18. Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693–709.
19. Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14), Article 1693.
20. Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
21. R.M. Goody, R. West, L. Chen, and D. Crisp. The correlated k-method for radiation calculations in nonhomogeneous atmosphere. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 42(6):539–550, 1989.
22. Cavallo, S. M., J. Dudhia and C. Snyder, 2011: A multi-layer upper boundary condition for longwave radiative flux to correct temperature biases in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1952–1959.
23. Chou M.-D., and M. J. Suarez, 1999: A solar radiation parameterization for atmospheric studies. NASA Tech. Memo. 104606, 15, 40pp.
24. Chou, M. D., M. J. Suarez, X. Z. Liang, and M. M. H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. NASA Tech. Memo. 104606, 19, 68pp.
25. Matsui, T., S. Q. Zhang, W.-K. Tao, S. Lang, C. Ichoku, and C. Peters-Lidard, 2018: Impact of Radiation Frequency, Precipitation Radiative Forcing, and Radiation Column Aggregation on Convection-Permitting West African Monsoon Simulations. *Clim. Dyn.*, 1-21, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4187-2>
26. Yang, P., L. Bi, B.A. Baum, K.-N. Liou, G.W. Kattawar, M.I. Mishchenko, and B. Cole, 2013: Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$ . *J. Atmos. Sci.*, 70, 330–347, doi:10.1175/JAS-D12-039.1
27. Радикевич В. М. Динамическая метеорология для океанологов, ЛГМИ, 1985, 157 с.
28. Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
29. Jimenez, P. A., and J. Dudhia, 2012: Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 300–316.
30. Lorente-Plazas, R., P. A. Jimenez, J. Dudhia, and J. P. Montavez, 2016: Evaluating and improving the impact of the atmospheric stability and orography on surface winds in the WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 2685–2693.

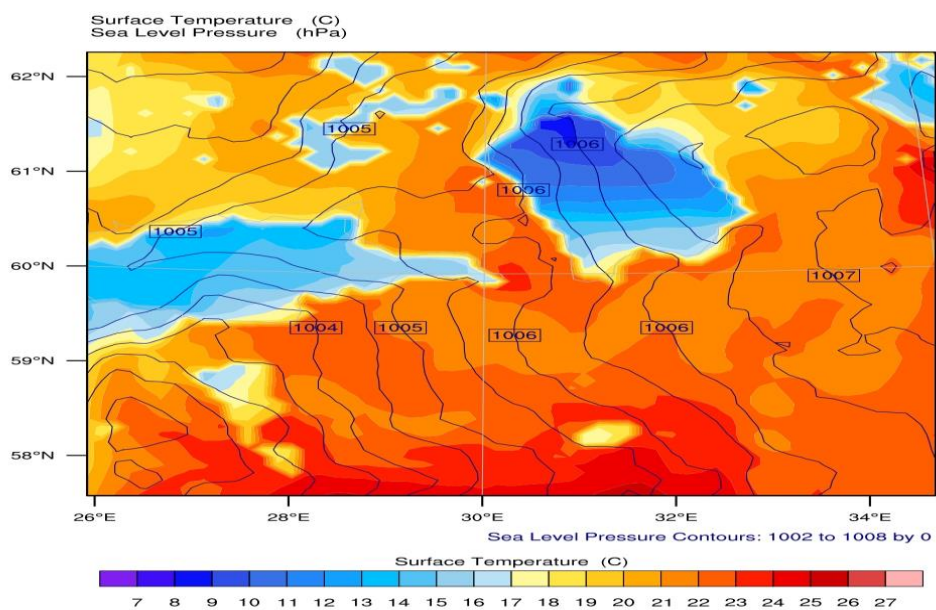
31. Wilson, T. H., and R. G. Fovell, 2018: Modeling the evolution and life cycle of radiative cold pools and fog. *Weather and Forecasting*, 33, 203–220.
32. Janjic, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP Eta Model, Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 354–355.
32. Mellor and Yamada, 1982
33. Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.
34. Bougeault, P., and P. Lacarrere, 1989: Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1872–1890.
35. Fairall, C., E. F. Bradley, J. Hare, A. Grachev, and J. Edson, 2003: Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *J. Climate*, 16, 571–591
36. Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
37. Li, D., E. Bou-Zeid, M. Barlage, F. Chen, and J. A. Smith, 2013: Development and Evaluation of a Mosaic Approach in the WRF-Noah Framework. *J. Geophys. Res.*, 118, 11918–11935.
38. Smirnova, T. G., J. M. Brown, and S. G. Benjamin, 1997: Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1870–1884.
39. Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, 101, 329–358.
40. Kusaka, H. and F. Kimura, 2004: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 67–80.
41. Chen, F., M. Tewari, H. Kusaka, and T. T. Warner, 2006: Current status of urban modeling in the community Weather Research and Forecast (WRF) model. Joint with Sixth Symposium on the Urban Environment and AMS Forum: Managing our Physical and Natural Resources: Successes and Challenges, Atlanta, GA, USA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM. J1.4.41.
41. Martilli et al., 2002
42. Martilli A, Clappier A, and Rotach M.W., 2002: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Bound.-Layer Meteorol.*, 104, 261–304.
43. Salamanca, F., and A. Martilli, 2010: A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 345–356.
44. Deardorff, J. W., 1972: Theoretical expression for the countergradient vertical heat flux. *J. Geophys. Res.*, 77, 5900–5904.

**Приложение А.** Поля приземной температуры и давления для всего расчётного региона в 12:00 по UTC за 01.07., 07.07., 13.07., 19.07., 25.07., 31.07. для тестовой конфигурации параметризаций.



13.07.

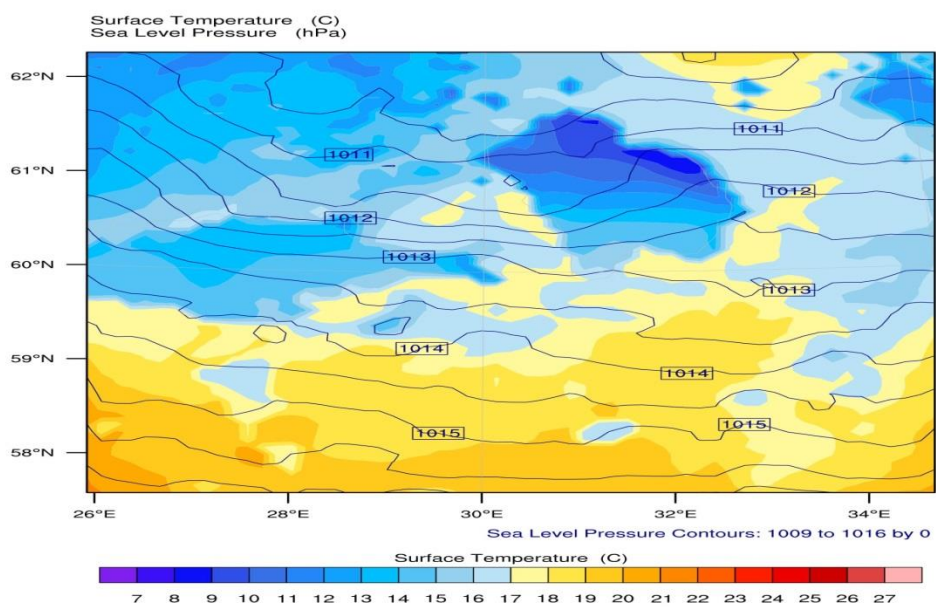
Init: 2017-07-01\_00:00:00



B)

19.07.

Init: 2017-07-01\_00:00:00

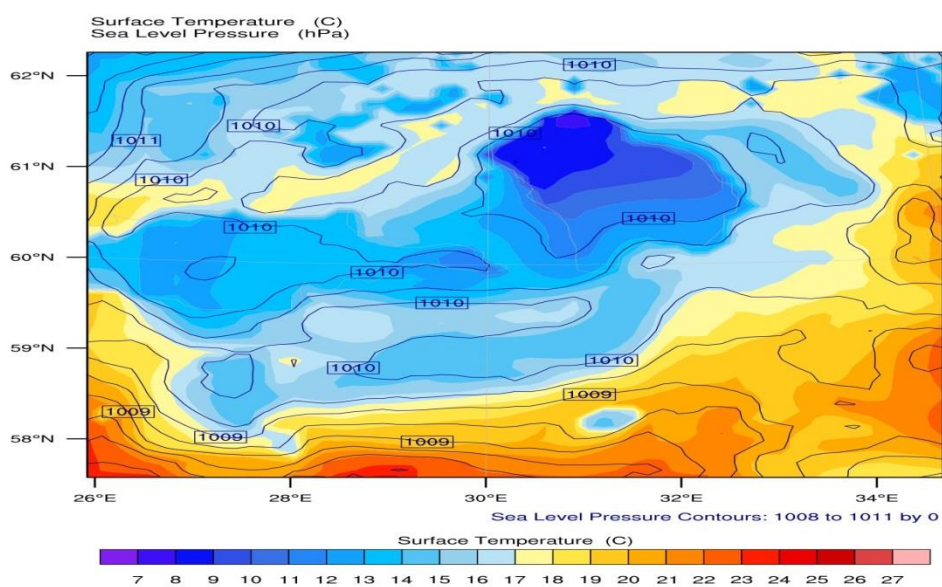


Г)



25.07.

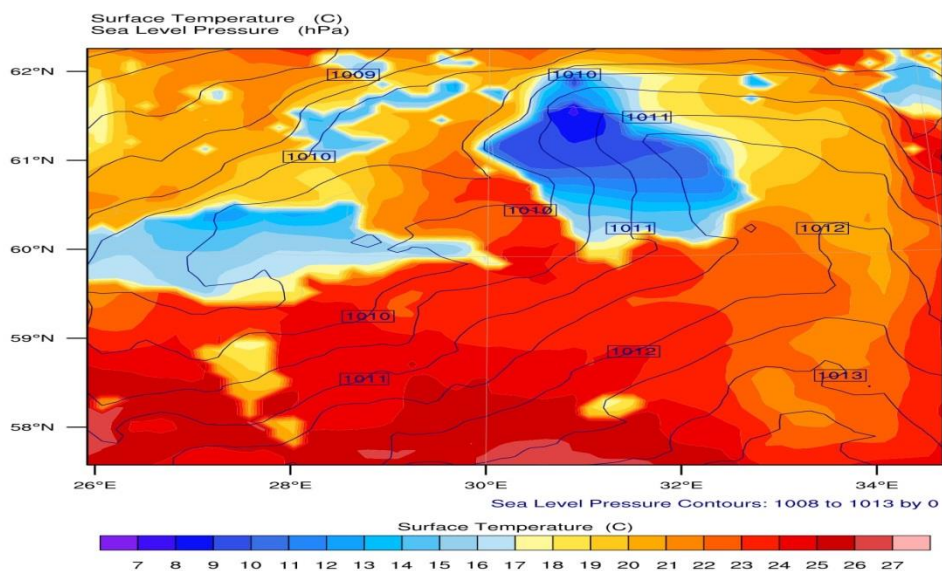
Init: 2017-07-01\_00:00:00



д)

31.07.

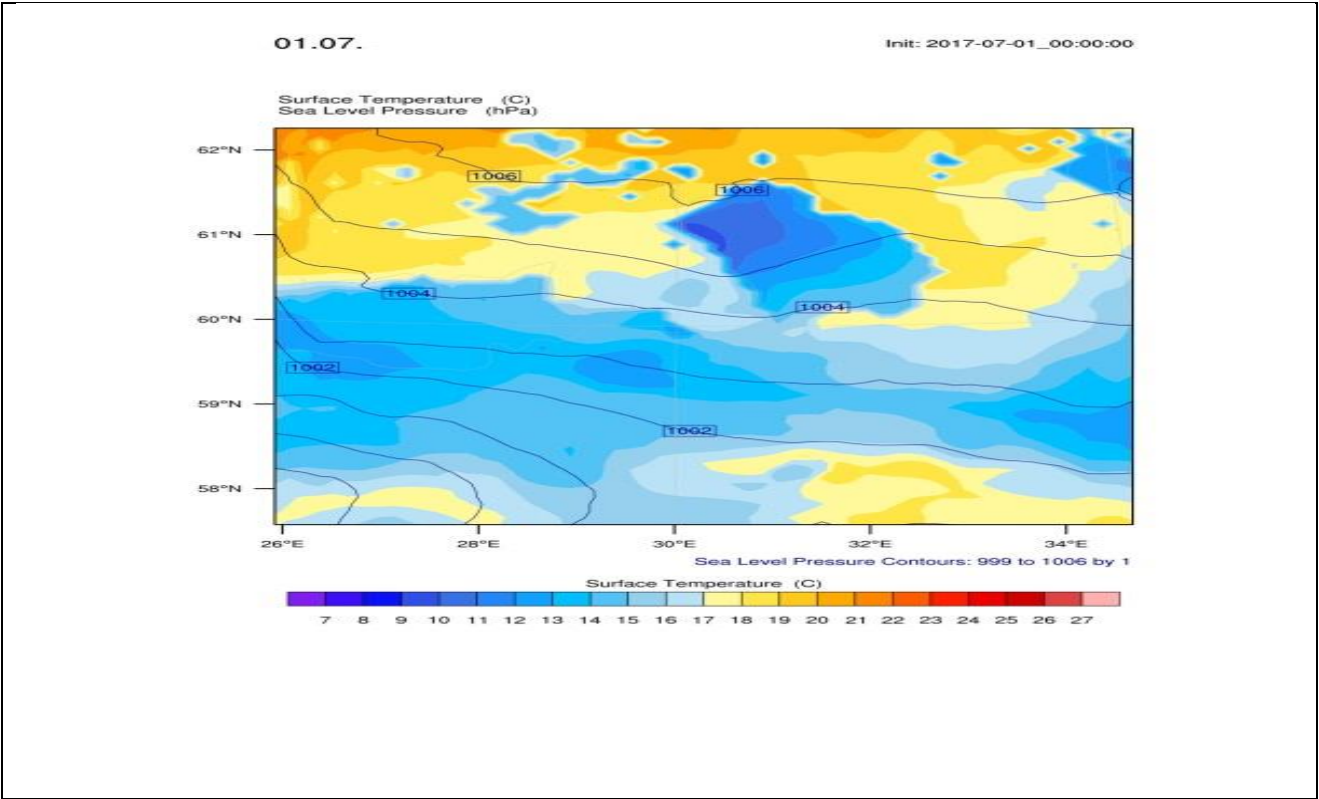
Init: 2017-07-01\_00:00:00



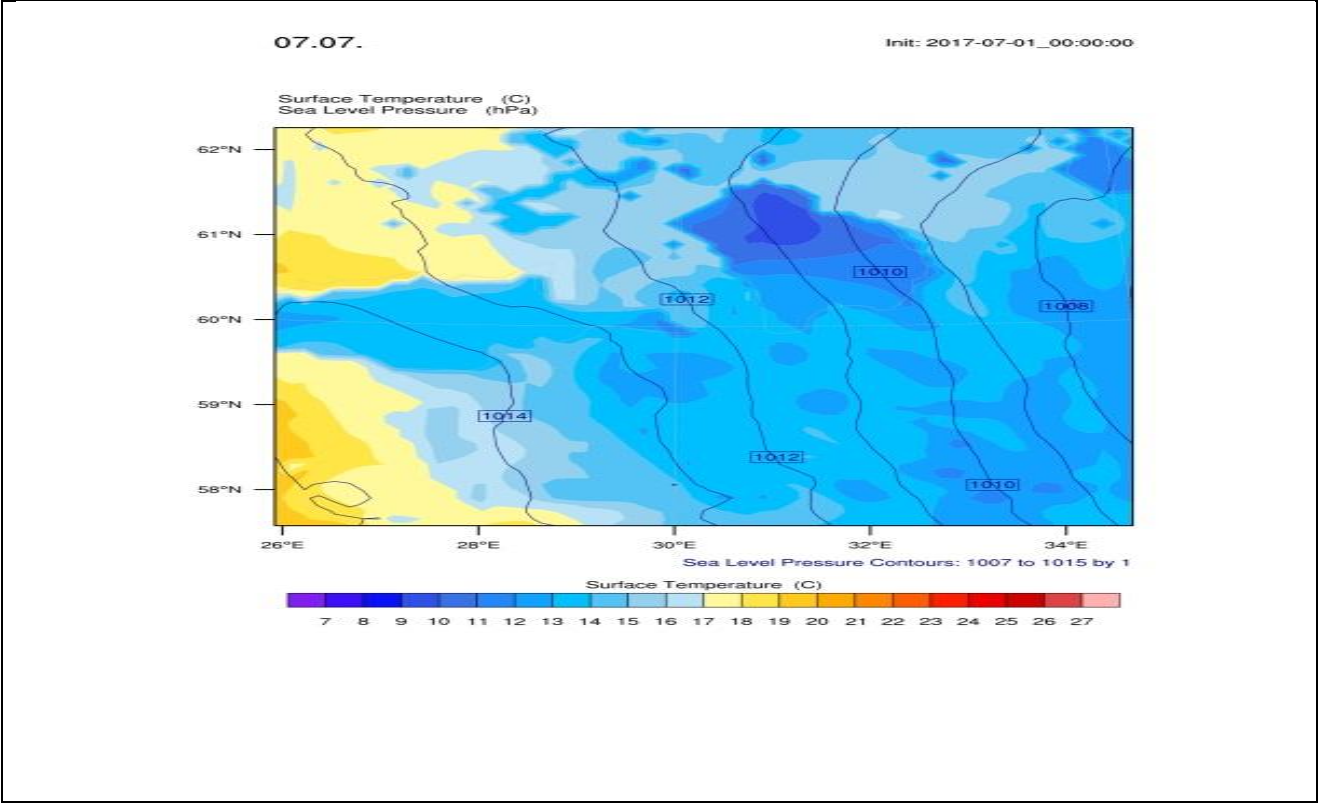
е)

Поля приземной температуры и давления для всего расчётного региона в 12:00 по UTC для тестовой конфигурации: а) 01.07; б) 07.07; в) 13.07; г) 19.07; д) 25.07; е) 31.07

**Приложение Б.** Поля приземной температуры и давления для всего расчётного региона в 12:00 по UTC за 01.07., 07.07., 13.07., 19.07., 25.07., 31.07. для оптимальной конфигурации параметризаций.



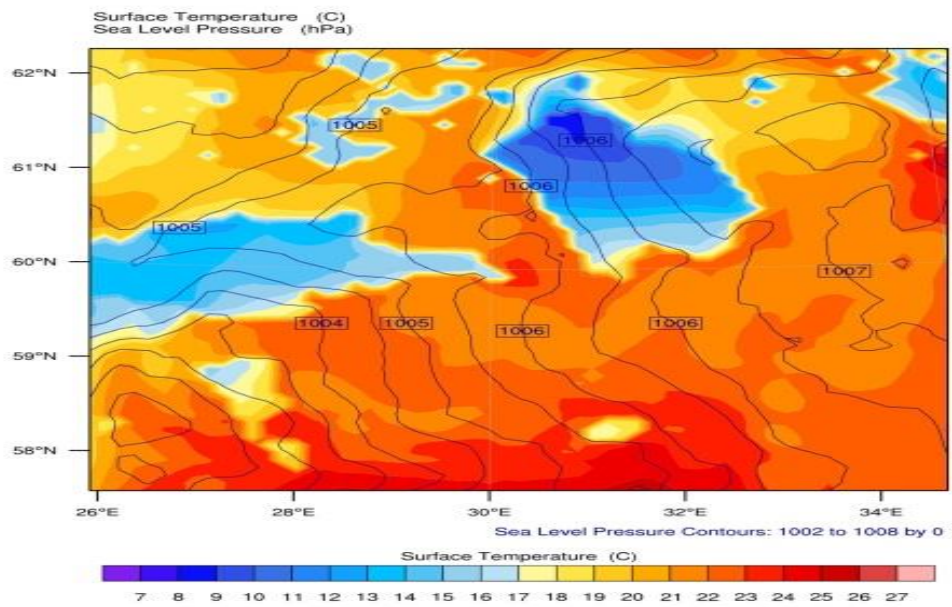
a)



б)

13.07.

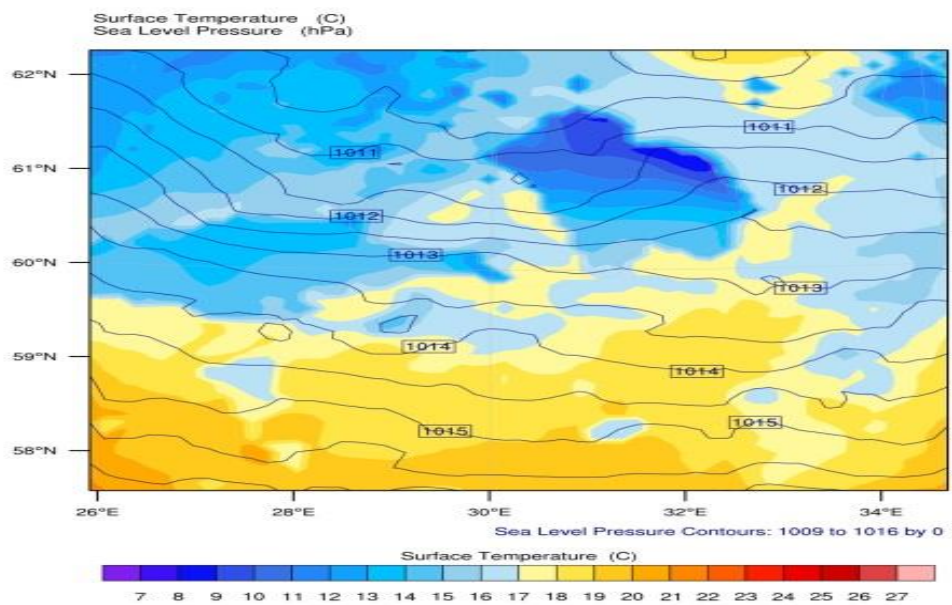
Init: 2017-07-01\_00:00:00



B)

19.07.

Init: 2017-07-01\_00:00:00

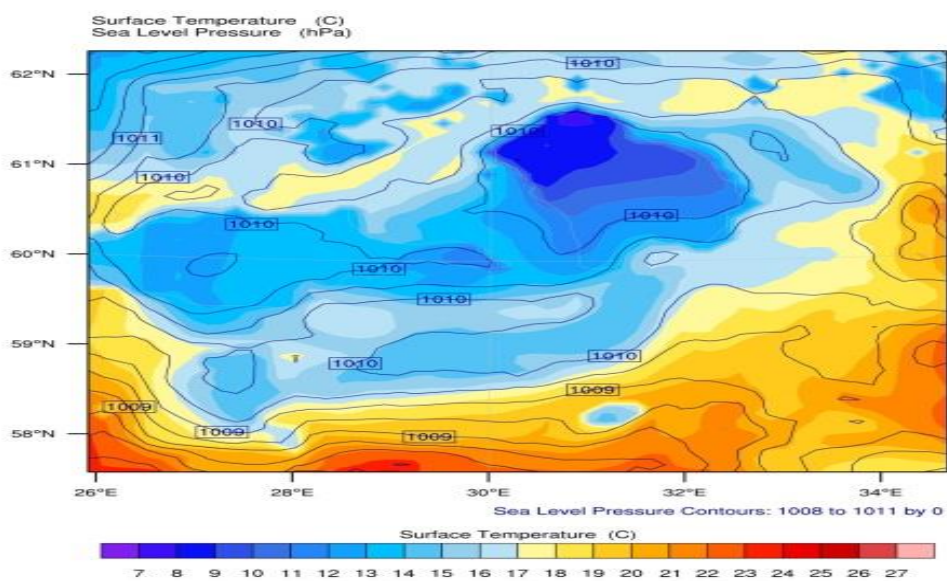


Г)



25.07.

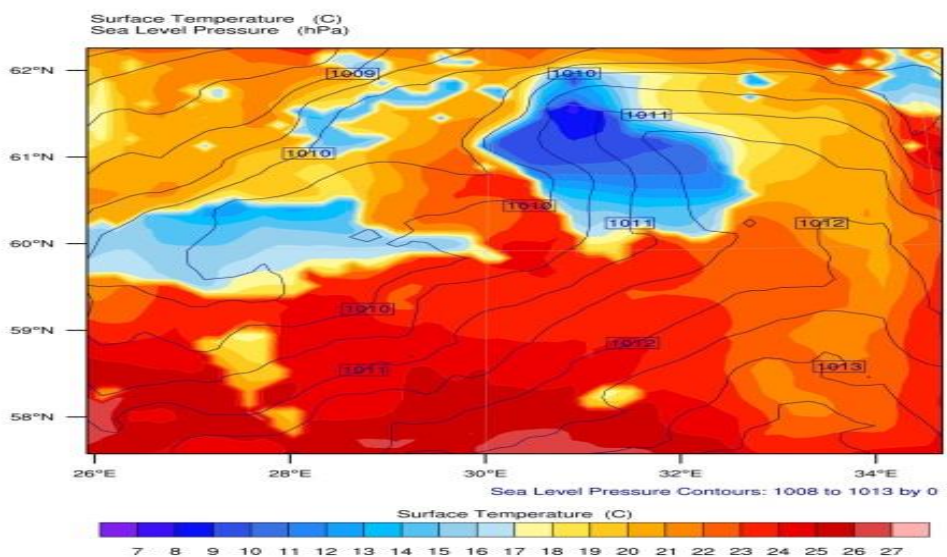
Init: 2017-07-01\_00:00:00



д)

31.07.

Init: 2017-07-01\_00:00:00



е)

Поля приземной температуры и давления для всего расчётного региона в 12:00 по UTC для оптимальной конфигурации: а) 01.07; б) 07.07; в) 13.07; г) 19.07; д) 25.07: е) 31.07